



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**PREDIKCE RIZIKA KONTAMINACE PODZEMNÍ
VODY PŘI ZÁVLAZE ODPADNÍMI VODAMI**

THE PREDICTION OF THE RISK BY WASTEWATER IRRIGATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Erika Burešová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

**PREDIKCE RIZIKA KONTAMINACE PODZEMNÍ
VODY PŘI ZÁVLAZE ODPADNÍMI VODAMI**

THE PREDICTION OF THE RISK BY WASTEWATER IRRIGATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Erika Burešová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Erika Burešová
Název	Predikce rizika kontaminace podzemní vody při závlaze odpadními vodami
Vedoucí práce	Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- 1) Databáze vědeckých článků www.sciencedirect.com
- 2) ČSN související s odpadními vodami a doplňkovou závlahou
- 3) Uživatelský manuál Hydrus 2D

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce se bude zabývat zpracováním naměřených výsledků výzkumu, jehož hlavní a nosnou náplní je sledování šíření znečištění při doplňkové závlaze odpadními nebo vyčištěnými odpadními vodami. Stěžejní část práce bude vyhodnocovat zjištěné hodnoty, resp. bude je implementovat do numerického modelu v prostředí Hydrus 2D. Po kalibraci výsledků bude vytvořeno několik modelových příkladů, z nichž bude následně patrné (nejen na základě vizualizací), jakým způsobem, jak rychle a do jakých hloubek se může dostávat specifické znečištění.

Část práce se zaměří také na rešerši v dané problematice, nicméně hlavním cílem bude vytvořený simulační model.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Michal Kříška, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou modelování závlahy vyčištěnou odpadní vodou pomocí softwaru HYDRUS 2D. První část práce je literární rešerší odborných informací a poznatků, které mají za cíl seznámit s problematikou využití vyčištěných odpadních vod pro účely závlahy s důrazem na Českou republiku. Následuje přehled důležitých hydropedologických charakteristik půd, teoretický základ numerického modelování pohybu a transportu rozpuštěných látek v půdě a využití softwaru HYDRUS 2D.

Praktická část práce navazuje na teoretický základ, ukazuje proces tvorby matematického modelu v prostředí programu HYDRUS 2D, jenž simuluje transport vstupního znečištění v půdním profilu. Vstupními daty pro tvorbu modelů jsou hodnoty naměřené na experimentálním zařízení v lokalitě Dražovice. Práce popisuje kalibraci a následnou aplikaci kalibrovaných modelů pro sledované parametry znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P-PO_4^{3-} a CHSK.

Z výsledných modelů je patrné, jakým způsobem, jak rychle a do jakých hloubek se může dostávat specifické znečištění.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydrus 2D, numerické modelování, závlaha, odpadní voda CHSK, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-}

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of simulation of treated wastewater irrigation by the HYDRUS 2D software. The first part of the thesis is designed as a literary research of academic information and knowledge. It aims at introducing the issue of treated wastewater utilization for the purpose of the irrigation with an emphasis on the Czech Republic. The following is an overview of important hydropedological characteristics of soils, the theoretical basis of numerical modeling of movement and transport of solutes in soil and the use of HYDRUS 2D software.

The practical part is based on theoretical knowledge and demonstrates the creating process of mathematical model in program HYDRUS 2D, simulating the transport of input pollution in the soil profile. Wastewater used for irrigation was treated using a system of mechanical pretreatment and horizontal filters planted with macrophytes situated on a CW Dražovice. This work describes the calibration and subsequent application of calibrated models for monitored pollution parameters $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P-PO_4^{3-} and COD.

KEYWORDS

Hydrus 2D, numerical modelling, irrigation, waste water, COD, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-}

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Erika Burešová *Predikce rizika kontaminace podzemní vody při závlaze odpadními vodami*. Brno, 2019. 82 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Predikce rizika kontaminace podzemní vody při závlaze odpadními vodami* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 2. 1. 2019

Bc. Erika Burešová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Predikce rizika kontaminace podzemní vody při závlaze odpadními vodami* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 2. 1. 2019

Bc. Erika Burešová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Michalu Kříškovi Dunajskému, Ph.D., za ochotu, odborné rady a podnětné připomínky k mé práci. Rovněž musím poděkovat celému řešitelskému týmu experimentálního měření za poskytnutí veškerých potřebných dat, výsledků a informací.

Dále chci poděkovat celé své rodině za podporu a zázemí, které mi poskytli po dobu celého studia i při psaní závěrečné diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	4
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	6
2.1	Závlahy	6
2.1.1	Rozdělení závlah	6
2.1.2	Praxe v České republice	7
2.2	Odpadní vody	9
2.2.1	Odpadní vody pro závlahu a legislativa	9
2.2.2	Podmínky pro využití odpadních vod pro závlahu	11
2.3	Výhody a rizika využití vyčištěné odpadní vody pro závlahu	12
2.4	Hydropedologické charakteristiky půd	14
2.4.1	Objemová hmotnost	14
2.4.2	Pórovitost	15
2.4.3	Vlhkost	16
2.4.4	Retenční čáry půdní vlhkosti	16
2.4.5	Hystereze retenční čáry	17
2.4.6	Hydraulická vodivost	17
2.5	Matematické modelování	18
2.5.1	Model a základní rozdělení	18
2.5.2	Princip spojitosti	19
2.5.3	Princip determinismu	20
2.5.4	Hydraulické řešení	20
2.5.5	Zákon zachování hmotnosti	21
2.5.6	Věta o změně hybnosti	21
2.5.7	Zákon zachování energie	21
2.5.8	Stavové rovnice	21
2.5.9	Postup při sestavení matematického modelu	22
2.5.10	Software Hydrus	23
2.6	Emisní standardy	24

3	PRAKTICKÁ ČÁST	26
3.1	Experimentální měření	27
3.2	Srážky	30
3.3	Tvorba modelu	31
3.3.1	Geometrie modelu	31
3.3.2	Simulační procesy	32
3.3.3	Časově proměnné okrajové podmínky	32
3.3.4	Časové charakteristiky	32
3.3.5	Data pro inverzní řešení	33
3.3.6	Hydraulické parametry půdy	33
3.3.7	Volba hydraulického modelu	34
3.3.8	Počáteční podmínky	34
3.3.9	Okrajové podmínky	34
3.4	Znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$	35
3.4.1	Vstupní hodnoty	36
3.4.2	Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty	37
3.4.2.1	Segment bez vegetačního pokryvu	37
3.4.2.2	Segment s travním porostem	38
3.4.2.3	Segment s řepkou olejnou	40
3.4.2.4	Segment s vojtěškou setou	41
3.4.3	Koeficienty z kalibračních modelů	42
3.4.4	Zkalibrované modely znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$	42
3.4.4.1	Segment bez vegetačního pokryvu	43
3.4.4.2	Segment s travním porostem	44
3.4.4.3	Segment s řepkou olejnou	45
3.4.4.4	Segment s vojtěškou setou	47
3.5	Znečištění P-PO_4^{3-}	49
3.5.1	Vstupní hodnoty	49
3.5.2	Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty	51
3.5.2.1	Segment bez vegetačního pokryvu	51
3.5.2.2	Segment s travním porostem	52
3.5.2.3	Segment s řepkou olejnou	54
3.5.2.4	Segment s vojtěškou setou	55
3.5.3	Koeficienty z kalibračních modelů	56
3.5.4	Zkalibrované modely znečištění P-PO_4^{3-}	56
3.5.4.1	Segment bez vegetačního pokryvu	57

3.5.4.2	Segment s travním porostem	58
3.5.4.3	Segment s řepkou olejnou	59
3.5.4.4	Segment s vojtěškou setou	60
3.6	Znečištění CHSK	61
3.6.1	Vstupní hodnoty	61
3.6.2	Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty	63
3.6.2.1	Segment bez vegetačního pokryvu	63
3.6.2.2	Segment s travním porostem	64
3.6.2.3	Segment s řepkou olejnou	66
3.6.2.4	Segment s vojtěškou setou	67
3.6.3	Koeficienty z kalibračních modelů	68
3.6.4	Zkalibrované modely znečištění CHSK	68
3.6.4.1	Segment bez vegetačního pokryvu	69
3.6.4.2	Segment s travním porostem	70
3.6.4.3	Segment s řepkou olejnou	71
3.6.4.4	Segment s vojtěškou setou	72
4	DISKUSE VÝSLEDKŮ	73
4.1	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	73
4.2	P-PO_4^{3-}	74
4.3	CHSK	74
5	ZÁVĚR	76
6	POUŽITÁ LITERATURA	77
7	SEZNAM TABULEK	80
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	81
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	83

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Potřeba vody a její nedostatek jsou v posledních letech často skloňovanými termíny. Česká republika, stejně jako ostatní státy Evropy, zažila několik po sobě jdoucích extrémně teplých a suchých roků. Za jeden z nejzávažnějších důsledků tohoto jevu považujeme negativní dopad sucha na oblast zemědělství. Je proto třeba hledat nové způsoby, jak se problému se suchem přizpůsobit.

Inspiraci můžeme hledat ve státech, které se s nedostatkem vody potýkají již delší dobu. Izrael, který z 60 % tvoří poušť, se naučil s vodou hospodařit takovým způsobem, že přebytek vody prodává svým sousedům. Hojně využívána je v izraelském zemědělství recyklovaná voda. Až 85 % splaškové vody je recyklováno a dále používáno pro závlahu. Do roku 2020 chce izraelská vláda tento podíl dokonce navýšit na 90 %. [Siegel, 2016]

Mimo Izrael můžeme snahu o recyklaci odpadní vody vidět i v zemích Jižní a Střední Ameriky jako je Mexiko, Chile nebo Peru. [Navarro, 2015]

Přínosů recyklace odpadní vody v zemědělství je více. Šetří značné množství vody pro první použití, která může posloužit jiné potřebě (ve světovém měřítku představuje spotřeba vody pro závlahu až 90% veškeré spotřeby). Dále odpadní voda poskytuje živiny, které mohou být účinnou náhradou syntetických hnojiv a zvyšovat tak úrodnost půdy a výnosy plodin při současném snižování výrobních nákladů. Tato alternativa také umožňuje rozšíření zemědělských ploch v suchých oblastech a jedná se o relativně levnou metodu zneškodňování surové odpadní vody, která přispívá k nižší míře znečištění recipientů. [Navarro, 2015]

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou částí, první z nich je zpracovaná jako literární rešerše, která má za cíl poskytnout základní informace týkající se závlahových systémů, odpadních vod a současnému nastavení v České republice. Na tyto kapitoly naváže zhodnocení výhod a nevýhod při využívání odpadních vod pro závlahu a stručná rešerše hydrogeologických charakteristik půd, které potenciálně ovlivňují transport znečištění v půdním profilu. Další kapitoly mají být teoretickým úvodem k problematice matematického, respektive numerického modelování jak v softwaru HYDRUS 2D.

Praktická část této práce si klade za cíl navázat na výsledky experimentálního výzkumu, který byl prováděn po dobu tří měsíců v areálu kořenové čistírny odpadních vod v obci Dražovice. Získané výsledky jsou zpracovány do přehledných grafů a tabulek pro tři sledované parametry – amoniakální dusík, fosfor a chemická spotřeba kyslíku. Pro každý parametr a zkušební segment bude vytvořen inverzním řešením z naměřených hodnot kalibrační model a následně model predikující transport znečištění v půdním profilu při různých závlahových dávkách. Celkem tak bude vytvořeno 3x4 kalibračních modelů a 3x4 modelů pro predikci.

Výstupem této práce bude zhodnocení rizika kontaminace půdního profilu po hloubce, potažmo kontaminace podzemní vody sledovanými ukazateli $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P-PO_4^{3-} a CHSK na základě experimentálního měření. V návaznosti na výsledky této práce by mohlo být přistoupeno k dalšímu experimentálnímu měření za vhodně upravených podmínek, které by do budoucna mohlo přinést velmi přesnou predikci šíření znečištění sledovaných ukazatelů v půdním profilu. Tato data jsou nezbytná pro správné a bezpečné nastavení závlahového množství a vstupních parametrů používané odpadní vody.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 ZÁVLAHY

Nedostatek nebo nevhodné rozdělení přirozených srážek, ke kterému periodicky dochází i v našich klimatických podmínkách, způsobuje snižování výnosů pěstovaných plodin. Této situaci se snaží zemědělci předcházet využíváním závlahy, která umožňuje rozdělit dodávku vody tak, jak to vyžadují jednotlivé plodiny v různých vývojových fázích. [Dufková, 2009]

2.1.1 Rozdělení závlah

Většina autorů (Šálek, Králová, Dufková) se shoduje na základním rozdělení závlah podle jejich účelu do tří hlavních kategorií. Jsou to závlahy:

- doplňkové
- hnojivé
- a zvláštní.

Závlahy doplňkové mají za cíl zlepšení vláhového stavu půdy. Především ve vegetačním období (od konce května do konce září) jsou do půdy dodávány závlahové dávky, které zvyšují nebo zkvalitňují rostlinou produkci. Požadavkem na závlahu je úspornost a šetrnost k půdnímu prostředí. Při závlaze nesmí dojít k poškození vegetačního půdního profilu zasolením, zamokřením či jiným způsobem. Velikost závlahového množství závisí na vláhovém nedostatku v půdě, stejně jako na příčinách jeho vzniku. Mezi hlavní příčiny vláhového nedostatku patří nedostatečně rozdělené srážky, teplota a vlhkost vzduchu, povětrnostní podmínky, svahové poměry nebo hydrologické poměry. [Králová, 2005]

Jak samotný název napovídá, účelem hnojivé závlahy je především hnojení půdy. Nejčastěji je prováděna z jara a na podzim, ojediněle i ve vegetačním období. Hnojivý účinek mají kalné říční vody či odpadní vody. Pokud v závlahové vodě chybí některé živiny, lze je doplnit roztokem minerálních hnojiv. Hnojivá závlaha je často používána v kombinaci se závlahou doplňkovou. [Králová, 2005]

Zvláštní závlahy plní i jinou příznivou funkci, než je zlepšování vláhového stavu. Jde o závlahy:

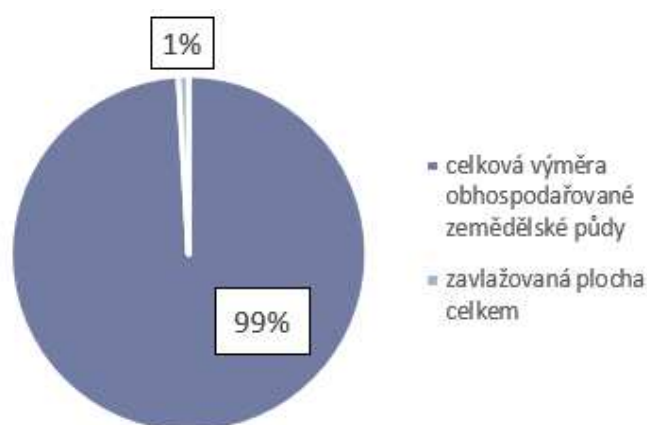
- proti mrazové
- klimatizační (osvěžovací)
- jemným postřikem (disperzní, impulsní, mikropostřik)
- promývací
- ochranné. [Dufková, 2009]

Podle způsobu můžeme závlahy rozdělit na:

- postřik
- podmok, přeron, výtopa, tj. povrchovou závlahu
- podzemní podmok, regulace HPV, tj. podpovrchovou závlahu
- kapkovou závlahu, bodovou závlahu, mikropostřik, tj. lokalizovanou závlahu či mikrozávlahu. [Dufková, 2009]

2.1.2 Praxe v České republice

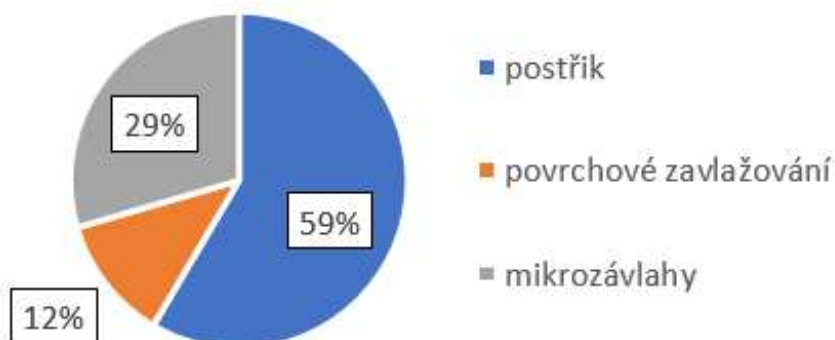
V České republice se, stejně jako v dalších státech Evropské unie, provádí každých deset let celoplošné šetření v zemědělských podnicích, které si klade za cíl vytvořit celkový obrázek o stavu zemědělství v jednotlivých státech. Poslední šetření pod názvem Agrocensus 2010 bylo provedeno v roce 2010 a z jeho výstupů můžeme získat cenné informace o aktuální situaci v oblasti zavlažování zemědělských ploch.



Graf 1 Podíl zavlažované plochy z celkové obhospodařované plochy [Agrocenzus 2010]

Celková výměra obhospodařované zemědělské půdy činí 3 483 500 ha, z toho pouze na 32 226 ha dochází k užití závlahových systémů. Zavlažovaná plocha tak odpovídá asi jednomu procentu celkové plochy. [Agrocenzus 2010] Je zajímavé, že Králová v textu z roku 2005 uvádí zavlažovanou plochu 140 000 ha tj. (3,5%). [Králová, 2005]

Zemědělské subjekty (fyzické a právnické osoby splňující kritéria pro zařazení do šetření Agrocenzus), které aktivně využívají závlahu, byly dotazovány na typ zavlažovacích zařízení, kterým disponují. Nejhojněji zastoupeným typem (609 subjektů, 59 % podíl) je závlaha postřikem. Mikrozávlahy vycházejí z šetření na druhém místě (307 subjektů, 29 % podíl). Nejméně zastoupeny jsou typy povrchových zavlažování (125 subjektů, 12 % podíl). [Agrocenzus 2010]



Graf 2 Podíl typu zavlažovacích zařízení na celkové závlaze [Agrocenzus 2010]

Je však třeba vzít v potaz skutečnost, že v této fázi šetření nebyl zkoumán podíl podle obhospodařované plochy, ale pouze podle počtu jednotlivých subjektů. Nemůžeme z něj tedy usuzovat, že postřiková zařízení slouží na téměř šedesáti procentech zavlažovaných ploch.

V další části šetření týkající se závlahy bylo zjišťováno, z jakých zdrojů zemědělské subjekty využívají vodu pro závlahu. Téměř šedesát procent (565 subjektů) využívá pro závlahu vodu z povrchových zdrojů. Následuje podzemní voda v 31% (294 subjektů) a nejméně využívaným zdrojem je voda z veřejného vodovodu (101 subjektů, 10%). [Agrocenzus 2010]



Graf 3 Podíl zdroje vody pro závlahu [Agrocenzus 2010]

Z šetření je patrné, že využívání odpadních vod a recyklovaných vod nemůže být v současnosti (respektive k roku 2010) na území České republiky významně zastoupeno, protože se vůbec nevyskytuje ve výstupech.

2.2 ODPADNÍ VODY

2.2.1 Odpadní vody pro závlahu a legislativa

Problematiku odpadních vod jako alternativního zdroje vody pro závlahu dobře popsal ve svém příspěvku na konferenci Závlahy a jejich perspektiva (2015) vedoucí útvaru povrchových a podzemních vod generálního ředitelství Povodí Vltavy M. Krátký. Připomíná, že Evropská unie zakomponovala problematiku recyklace odpadních vod již v lednu 1991 do Směrnice Rady 91/271/EHS ve znění Směrnice Rady 98/15/ES O čištění městských

odpadních vod. V článku 12 této směrnice se říká „*Kdykoli je to vhodné, měly by být vyčištěné odpadní vody znovu použity. Způsoby zneškodňování musí minimalizovat nepříznivé účinky na životní prostředí.*“ [Směrnice Rady č. 91/271/EHS]

Česká republika si pro implementaci této směrnice vyjednala dvě přechodná období – do roku 2006 a 2010. (eagri.cz) V roce 2010 pak přijala významnou novelu vodního zákona, zákon č. 150/2010 Sb., kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve kterém proklamativně zavádí pojem sucho. Do dnešní doby však žádné povinnosti ani konkrétní způsoby řešení sucha vodní zákon ani prováděcí obecně závazné předpisy neobsahují. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

Ve zmiňovaném příspěvku M. Krátký rovněž upřesňuje terminologii závlah, aby nadále nedocházelo ke špatné interpretaci ze strany laické i odborné veřejnosti.

Hlavní závlahová zařízení a podrobná závlahová zařízení, která slouží k dopravě a rozvodu závlahových vod mohou být koncipována:

- a) k umělému vyrovnání vláhového deficitu zemědělských plodin
- b) k aplikaci hnojivých a jiných roztoků na zemědělské plodiny a zatravněné pozemky
- c) k tepelné regulaci – protiúrazové ochraně nebo ochlazování zemědělských plodin a zatravněných pozemků

Mezi hlavní závlahové zařízení, tj. sloužící k dopravě závlahové vody, řadíme například odběrné objekty, nádrže, otevřené kanály a objekty na nich, závlahová trubní síť pro přívod závlahové vody, čerpací stanice, vzdušníky a kalníky, výtlaky, hydranty, kryté přivaděče a objektů na nich.

Mezi podrobná závlahová zařízení, tj. k rozvodu závlahové vody, pak řadíme například otevřené příkopy, přenosné potrubí včetně armatur, postřikovače, pásové zavlažovače, širokozáběrové zavlažovací stroje, zavlažovací hadice s kapkovači a další. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

Druhy používané závlahové vody můžeme rozdělit na:

- a) povrchové vody (§ 2 odst. 1 vodního zákona)
- b) podzemní vody (§ 2 odst. 2 vodního zákona)

- c) odebrané vody povrchové (§ 8 odst. 1 písm. a) bod 1 vodního zákona)
- d) odebrané podzemní vody (§ 8 odst. 1 písm. b) bod 1 vodního zákona)
- e) odpadní vody (§ 38 odst. 1 vodního zákona) [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

Pro užívání odpadních vod k závlaze v zemědělství nebo na zatravněných pozemcích musí být předně splněna základní povinnost ochrany povrchových a podzemních vod, jak je dána § 5 odst. 1 vodního zákona, tj. „*Každý, kdo nakládá s povrchovými nebo podzemními vodami, je povinen dbát o jejich ochranu a zabezpečovat jejich hospodárné a účelné užívání podle podmínek tohoto zákona a dále dbát o to, aby nedocházelo k znehodnocování jejich energetického potenciálu a k porušování jiných veřejných zájmů chráněných zvláštními právními předpisy*“. [Zákon č. 254/2001 Sb.]

Zneškodňování odpadních vod je vodním zákonem definováno jako:

- A. **Vypouštění odpadních vod do vod povrchových nebo podzemních** na základě povolení k nakládání s povrchovými a podzemními vodami podle ustanovení § 8 odst. 1 písm. c) vodního zákona
- B. **Jiným zneškodňováním odpadních vod** bez povolení podle ustanovení § 5 odst. 3 vodního zákona [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

Při využívání odpadních vod pro závlahu se dle M. Krátkého uplatňuje právě odstavec B, tedy tzv. jiné zneškodňování odpadních vod, a to bez povolení k nakládání s vodami podle ustanovení § 5 odst. 3 vodního zákona. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

2.2.2 Podmínky pro využití odpadních vod pro závlahu

Při využití odpadních vod jako zdroje pro závlahu zemědělských plodin nebo zatravněných pozemků musí být s ohledem na ochranu povrchových a podzemních vod splněny následující podmínky, které vycházejí z požadavku Vodního zákona na jiné zneškodňování odpadních vod bez povolení k vypouštění [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015] (viz předchozí kapitola)

- Jednotlivé závlahové dávky nesmí zhoršit jakost povrchových nebo podzemních vod vniknutím. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]
- Jednotlivé závlahové dávky musí být do půdy dodávány v takovém množství, při kterém nedojde k překročení polní vodní kapacity (maximální množství kapilárně zavěšené vody, které půda zadrží kapilárními silami, tj. maximální množství vody, které je půda schopna trvaleji zadržet [Kameníčková, 2006]), čímž se zamezí proniknutí odpadní vody do vody podzemní. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]
- Závlahové dávky musí být aplikovány pouze ve vegetačním období, v době mimo srážkové období tak, aby se odpadní voda nedostala do recipientu. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]
- Závlahové dávky nesmí být aplikovány do sněhové nebo ledové pokrývky, i ta je ve smyslu Vodního zákona vodou povrchovou a tudíž chráněnou. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]
- Množství a jakost závlahové dávky musí splňovat kritéria stanovená pro jednotlivé druhů zemědělských plodin a zatravněných pozemků. Jedná se zejména o metodiku vydanou Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy (VÚMOP) „Kritéria využití městských odpadních vod k závlaze zemědělských plodin“ a ČSN 757143 Jakost vody pro závlahu. [Závlahy a jejich perspektiva, ČHMÚ, 2015]

2.3 VÝHODY A RIZIKA VYUŽITÍ VYČIŠTĚNÉ ODPADNÍ VODY PRO ZÁVLAHU

Ve snaze přicházet s novými opatřeními, kterými se adaptujeme na změny klimatu a s tím souvisejícími nedostatečnými tradičními zdroji závlahové vody v některých geografických oblastech, se nabízí využití vhodných odpadních vod a možnosti recyklace části vod z odpadních vod z čistíren k závlaze zemědělských a lesních pozemků. Tento způsob závlahy představuje ve vodním hospodářství krajiny progresivní prvek, protože současně přináší celou řadu výhod. [Kulhavý, Šálek, 2018]

Řeší jak problematiku nedostatku zdrojů závlahové vody, zneškodnění některých čištěných odpadních vod, zvýšení úrodnosti zavlažované půdy dodávkou živin (hnojivá závlaha)

a v neposlední řadě také mohou snižovat ekonomické náklady na výstavbu a provoz čistírenských staveb. [Kulhavý, Šálek, 2018]

Při závlaze odpadní vodou dochází k vysokému stupni využívání dusíku a fosforu, tedy nutrientů, které jsou nezbytné pro tvorbu rostlinné biomasy, a zároveň se významně snižuje nebezpečí eutrofizace recipientů. [Kulhavý, Šálek, 2018]

Tabulka 1 Obsah nutrientů v odpadní vodě podle jejího původu [Kulhavý, Šálek, 2018]

Druh odpadní vody a kejda	Obsah živin v g/m ³		
	N	P	K
Městské (komunální)	55	10	40
Cukrovarské	30	10	70
Škrobářenské (bramborářské)	130	40	220
Škrobářenské (pšeničné)	215	75	150
Lihovarské (zemědělské)	75	20	210
Mlékárenské	70	30	50
Konzervářenské (ovoce, zelenina)	30	10	50
Drůbežářenské průmyslové	90	20	130
Pivovarské se sladovnamy	30	25	80
Droždářenské	240	10	450
Kejda prasat velkovýkrmny			
- surová	3100	420	310
- separovaná	3300	350	335
- po třístupňové aktivaci	1000	200	400
- vyčištěná	500	100	300

Rizika vznikající v souvislosti s užitím odpadních vod při závlaze jsou v rozhodující míře určena jejich vlastnostmi. Tyto vlastnosti se velmi liší aglomeraci od aglomerace. U nečištěných městských odpadních vod detekujeme vysoké množství mikrobiálního znečištění a celou řadu organických i anorganických sloučenin. [Zavadil, 2008]

Potenciální riziko bakteriálních, virových a parazitárních onemocnění, které mohou být přenášeny prostřednictvím cyklu člověk – voda – půda – plodina – člověk, představuje nejzávažnější problém spojený s využíváním odpadních vod v zemědělství. Eliminace těchto rizik musí být předmětem dalších studií. [Navarro, 2015]

V posledních dvaceti letech se stále častěji objevují také studie o tzv. nově vznikajících znečištěních (emerging pollutants), což jsou zejména léčiva, ale také přísady do benzínu, plasty, čisticí prostředky a jiné. U většiny těchto látek však stále chybí dostatečně průkazná data, která by prokazatelně stanovila jejich ekotoxicitu a jejich účinky na lidské zdraví. Mnohé z těchto sloučenin se dostanou do životního prostředí odpadními vodami a mohou být odstraněny v čistírnách odpadních vod, nicméně některé z nich zůstávají v ošetřených odpadních vodách a vstupují do životního prostředí, případně do podzemních vod. [Navarro, 2015]

2.4 HYDROPEDOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY PŮD

2.4.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je hmotnost objemové jednotky zeminy v přirozené struktuře. Stanovuje se jako podíl hmotnosti zeminy k jejímu objemu. V závislosti na obsahu vody ve vzorku půdy rozlišujeme:

- a) *objemovou hmotnost neredukovanou* (p_v), která se mění v závislosti na obsahu momentální vlhkosti ve vzorku:

$$p_v = \frac{G_A}{V_s} [\text{g/cm}^3] \quad (1)$$

- b) *objemovou hmotnost redukovanou* (p_d), která se určuje po vysušení a charakterizuje stálé vlastnosti půdy.

$$p_d = \frac{G_F}{V_s} [\text{g/cm}^3] \quad (2)$$

Kde:

G_A je hmotnost zeminy s původní okamžitou vlhkostí [g],

G_F je hmotnost vysušení zeminy [g],

V_s je objem fyzikálního válečku [cm^3]. [Kameníčková, 2006]

2.4.2 Pórovitost

Celková pórovitost (P) – vyjadřuje okamžité zastoupení objemu pórů v celkovém objemu půdy. Neudává největší hodnotu objemu vody, která by mohla vyplnit půdní prostor. Vlivem bobtnání koloidů se zvětšuje se zvyšující se vlhkostí půdy i její pórovitost, při vysychání půdy se pórovitost půdních vzorků zmenšuje. Pouze u čistých písků a podobných materiálů hodnota celkové pórovitosti představuje největší možný objem vlhkosti, a naopak provzdušenosti půdy. Bližší podrobnosti o kvalitě pórů podává jejich dělení na:

- A) *Kapilární póry (P_K)*, jsou totožné s hodnotou přibližné retenční vodní kapacity, vedou vodu proti gravitaci. Velké množství kapilárních pórů znesnadňuje infiltraci, půda přijímá málo vody, provlhčení působí do malé hloubky, dochází k neefektivnímu využití srážek a ke zvýšení povrchového odtoku s nebezpečím svahové eroze. Po skončení zavlažení dochází k rychlému vysychání. Při nasycení půdy vodou je malá provzdušenost. Nedostatečné zastoupení kapilárních pórů – malá zásoba vody v půdě pro vegetaci.
- B) *Semikapilární póry (p_s)*, nastává v nich pozvolné ustalování půdní vody. Je to přechodná kategorie mezi póry kapilárními a nekapilárními. Jsou udány rozdílem objemové vlhkosti po 30' odsávání a přibližné retenční vodní kapacity. Tyto póry umožňují dobrý pronik vody do půdy a její zadržení. Dále umožňují nasycení kapilárních pórů do větších hloubek.
- C) *Nekapilární póry (p_n)* představují dutiny, z nichž ihned odtéká gravitačně voda. Nekapilární póry umožňují vnikání vody do půdy a její pronik do větších hloubek. Při jejich nadbytku se vlhkost půdy v povrchové vrstvě příliš nemění, rychlost prosakující vody je tak velká, že nedojde k nasycení kapilárních pórů a voda se ztrácí do hloubky z dosahu kořenů rostlin. Zásoba vody s příliš vysokým obsahem nekapilárních pórů je nízká. [Kameníčková, 2013]

Optimální zastoupení kapilárních pórů má být asi 2/3 z pórovitosti. Zbytek by měl být přibližně rovným dílem rozdělen mezi póry semikapilární a nekapilární. [Kameníčková, 2013]

2.4.3 Vlhkost

Vlhkost vyjadřuje míru naplnění pórů, nejčastěji se užívá tzv. objemová vlhkost.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (3)$$

Kde:

V_w je objem vody [cm^3]

V je celkový objem vzorku [cm^3]. [Císlerová, Vogel, 1998]

Lze vyjádřit i hmotnostní vlhkost půdy, tedy poměr hmotnosti vody k hmotnosti tuhé fáze půdy.

$$w = \frac{m_w}{m_z} \quad (4)$$

Kde:

M_w je hmotnost vody

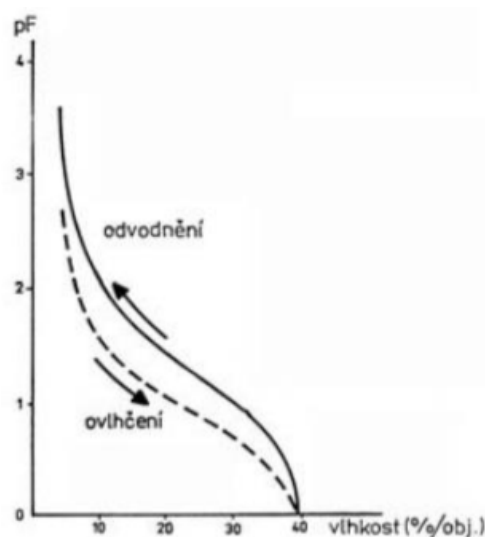
M_z je hmotnost vysušeného vzorku. [Kutílek, Kuráž, Císlerová, 2000]

2.4.4 Retenční čáry půdní vlhkosti

Retenční čáry jsou grafickým zobrazením vzájemného vztahu mezi vlhkostí půdy a sacím tlakem nebo tlakovou výškou (vlhkostním potenciálem) a vyjadřují schopnost půdy zadržovat vodu. Protože je průběh retenční čáry závislý na zrnitostním složení půdy, struktuře, objemové hmotnosti a dalších parametrech, je nutné stanovit ji zvlášť pro každou analyzovanou půdu. Pro křivky s větším rozsahem sacího tlaku ($0-10^5$ Pa a více) se graf zobrazuje v semilogaritmickém měřítku, vlhkostní potenciál se vynáší v logaritmickém měřítku a retenční čára je často označována jako pF čára. [Kutílek, Kuráž, Císlerová, 2000]

2.4.5 Hystereze retenční čáry

Vlhkostní potenciál v reálném prostředí nabývá různých hodnot v závislosti na plnění a prázdnění půdních pórů, což je názorně vidět na obrázku níže. Tento jev nazýváme hysterezí. [Kameníčková, 2013]



Obrázek 1 Hystereze retenční křivky (převzato: pedologie.czu.cz)

Velikost hystereze je závislá na zrnitostním složení půdy, které určuje rozdělení a velikost pórů. [Císlerová, Vogel, 1998] Způsobuje ji především vliv uzavíraného vzduchu ve slepých pórech a rozdílná hodnota smáčecího úhlu při postupu kapaliny přes suchý a vlhký povrch. [Kutílek, Kuráž, Císlerová, 2000]

Významnou roli může hrát u hrubozrnných zemin, naproti tomu u jemnozrnných může být její vliv minimální. [Císlerová, Vogel, 1998] Při popisu jednosměrného proudění vody se vliv hystereze neuvažuje, pouze je třeba zvolit odpovídající větev retenční čáry. [Kameníčková, 2013]

2.4.6 Hydraulická vodivost

Průběh hydraulických vodivostí je spolu se stanovením retenčních čar půdní vlhkosti základní hydraulickou vlastností půdního prostředí. [Kameníčková, 2013] Hydraulická vodivost K_s je hydraulická vlastnost půdy přímo závislá na pórovitosti charakterizující,

jak půdní prostředí umožňuje pohyb vody. Její hodnota závisí na textuře, struktuře a fyzikálně chemických poměrech v půdě. U písčitých půd nabývá hodnot větších než 10 cm/den, u jílu v řádech desetin cm/den. [Kutílek, Kuráž, Císlerová, 2000]

Nasycená hydraulická vodivost je stav, kdy jsou všechny póry vyplněny vodou za konstantního tlaku. To znamená, že vlhkost půdy θ je rovna hodnotě pórovitosti. [Kameníčková, 2013]

Pro proudění v nenasycené půdě platí obdobné vztahy, jako v prostředí nasyceném. Je však třeba mít na paměti, že část pórů je nasycena vzduchem a při proudění se může půda dosycovat vodou nebo odvodňovat. [Kutílek, Kuráž, Císlerová, 2000]

2.5 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Při zpracování praktické části této práce bude využit modelovací software Hydrus. Pro pochopení jeho fungování a následně správné definice zadání, je třeba shrnout obecné principy a zákonitosti matematického modelování.

Metody řešení úloh proudění podzemní vody můžeme v zásadě rozdělit do dvou kategorií:

- Matematické metody
 - Analytické
 - Numerické – v současnosti nejrozšířenější
- Experimentální metody
 - Přímé
 - Nepřímé (analogické) [Říha, 2007]

2.5.1 Model a základní rozdělení

Model je účelově zjednodušené zobrazení reálného nebo abstraktního světa. Používá se za účelem poznání a popsání konstrukce originálu, jeho změn a podmínek. Míra souhlasu mezi skutečností a zjednodušenou skutečností ovlivňuje věcnou přesnost modelu. [Říha, 2007] Míra zjednodušení závisí na cílech, kterých chceme dosáhnout, stejně jako na prostředcích,

které máme k dispozici (dostupná data, technické možnosti, výpočetní technika). [Jandora, 2008] O matematickém modelu hovoříme, pokud určitý výsek skutečnosti popisujeme matematickými prostředky. Numerickým modelem je pak myšlena diskretizace obecného matematického modelu. [Říha, 2007]

Matematické modely proudění podzemní vody jsou známy již od 19. století. S rozvojem a dostupností výpočetní techniky od 60. let 20. století zažily velký rozmach numerické metody pro řešení parciálních diferenciálních rovnic (popisujících proudění podzemní vody) a v současnosti jsou tyto metody nejvíce rozšířenou možností řešení praktických úloh proudění vody a znečišťujících látek v podzemním prostředí. [Jandora, 2008]

Matematické modely proudění kapaliny lze dělit z několika hledisek, přičemž různí autoři přichází s různým dělením. Například Říha uvádí:

- podle prostorové dimenze
 - jednorozměrné – 1D,
 - dvojrozměrné – 2D,
 - trojrozměrné – 3D,
- podle časového režimu proudění
 - stacionární (ustálené proudění)
 - nestacionární (neustálené proudění)
- podle povahy vstupních a hledaných veličin
 - stochastické,
 - deterministické

2.5.2 Princip spojitosti

Princip spojitosti vychází z předpokladu, že kapalina vyplňuje celou zkoumanou oblast spojitě, tj. vyplňuje jak póry, tak i pevné částice. Fiktivní rychlost proudu je lépe nazývat specifickým průtokem. Pak platí, že specifický průtok q , piezometrická výška h a tlak p jsou spojitými funkcemi místa a času. [Říha, 2007]

$$q(x, y, z, t), p(x, y, z, t), h(x, y, z, t).$$

2.5.3 Prinsip determinismu

2.5.4 Hydraulické řešení

- zákon zachování hmotnosti
- věta o změně hybnosti
- zákon zachování energie
- stavové rovnice [Jandora, 2008]

2.5.5 Zákon zachování hmotnosti

Diskrétním vyjádřením zákona zachování hmotnosti je rovnice kontinuity proudění. Vyplývá z ní, že rozdíl mezi hmotnostmi kapaliny do elementu vtékající a vytékající za časový interval, se rovná časové změně hmotnosti kapaliny obsažené v tomto elementu. [Jandora, 2008]



Obrázek 3 Zákon zachování hmotnosti [Jandora, 2008]

2.5.6 Věta o změně hybnosti

Vyjádřením věty o změně hybnosti jsou pohybové rovnice, které lze formálně zapsat pro směry x, y, z rovnoběžné s osami kartézské soustavy jako:

$$\rho \cdot \frac{Dv}{Dt} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \sum_{i=1}^3 F_i \quad (5)$$

Kde:

$\frac{Dv}{Dt}$ je substanciální derivace vektoru rychlosti

$F_{1,2,3}$ jsou silové účinky od změny tlaku, objemové síly a odporová síla [Říha, 2007]

2.5.7 Zákon zachování energie

Principem zákona zachování energie je, že se energie nemůže ani ztratit, ani se objevit „z ničeho“. Její celková velikost je tedy pro uzavřenou izolovanou soustavu konstantní (tj. časově neměnná). Jeden druh energie však může přecházet v jiný druh, za předpokladu, že přírůstek jedné energie je právě roven úbytku energie jiné. [Jandora, 2008]

2.5.8 Stavové rovnice

Obecný zápis stavové rovnice pro kapalinu v klidu je:

$$f(p, V, T) = 0 \quad (6)$$

Kde

p je tlak,

V objem,

T teplota. [Jandora, 2008]

2.5.9 Postup při sestavení matematického modelu

Obecný postup pro sestavení matematického modelu uvádí Říha a později ho doplňuje Jandora.

1. **stanovení cílů**, kterých má být modelováním dosaženo je prvním a nejdůležitějším krokem. Současně je nutné zvážit požadovanou přesnost modelu a předpokládanou dobu, po kterou bude model sloužit.
2. **podrobná analýza a matematická formulace problému** – z analýzy vyplývají nároky na množství a kvalitu dat a dále pak technické a materiální možnosti řešitele. Základním teoretickým aparátem jsou:
 - zákon zachování hmotnosti;
 - zákon zachování hybnosti;
 - zákon zachování energie;
 - stavové rovnice;
3. **zjednodušující předpoklady** – na základě účelu modelu se aplikují zjednodušující předpoklady, například nestlačitelnosti kapaliny.
4. **výběr a aplikace metody řešení** – mezi nejvíce používané numerické metody patří metoda diferenční, variační (metoda konečných prvků, metoda hraničních prvků atd.) a metody spektrální.
5. **algoritmizace úlohy** – algoritmus jednoznačně určuje postup řešení problému od počátečních údajů až k hledanému výsledku. Při zápisu algoritmu se v drtivé většině používá vývojových algoritmů.

6. **numerické testy** – ověřují správnost použitého algoritmu a odhalují případné chyby ve zdrojovém programu.
7. **kalibrace modelu** – porovnává výstupy z měření na reálném objektu s modelem, Podstatou kalibrace je stanovení parametrů modelu tak, aby výsledky z modelu a z reálného měření byly požadovaně přesné.
8. **citlivostní analýza** – metodami statistické analýzy se posuzuje závislost vlivu vstupních veličin a parametrů modelu na výsledky řešení.
9. **verifikace modelu** – k ověření modelu se používají jiná vstupní data, než jaká byla použita při jeho kalibraci. Model je verifikovaný, pokud dává výsledky, které jsou v dostatečné shodě s hodnotami naměřenými.
10. **simulace vybraných stavů na kalibrovaném a verifikovaném modelu** – umožňuje sledovat průběh dějů, které jsou předmětem zkoumání. Výsledky takového řešení jsou následně podkladem pro rozhodování ve fázi projektování, výstavby a provozu.

2.5.10 Software Hydrus

Pro řešení proudění znečištění v půdním profilu je vhodným modelovacím softwarem široce rozšířený HYDRUS 2/3D. Výrobce na svých stránkách www.pc-progress.com uvádí, že se jedná o softwarový balík pro simulaci pohybu vody, tepla a znečištění ve dvourozměrných a trojrozměrných porézních médiích. Hydrus se skládá z výpočetního počítačového programu a interaktivního grafického uživatelského rozhraní. Je primárně určen pro operační systém Windows. Výpočetní software je založen na metodě konečných prvků a obsahuje též algoritmus optimalizace pro inverzní odhad různých parametrů. Součástí uživatelského rozhraní je celá řada možností pro analýzu a prezentaci výsledků jako jsou grafy, animace proudění či přehledné tabulky.

Autory programu jsou českoslovenští rodáci profesor Jiří Šimůnek a Miroslav Šejna, ve spolupráci s doktorem van Genuchtenem z Brazílie.

2.6 EMISNÍ STANDARDY

Tato kapitola je výňatkem z Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.

Tabulka 2 Emisní standardy: přípustné hodnoty (p)³⁾, maximální hodnoty (m)⁴⁾ a hodnoty průměru⁵⁾ koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v mg/l

Kategorie ČOV (EO) ¹⁾ nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄ ⁺ *		N _{celk} ^{2),8)} *		P _{celk}	
	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾	p ³⁾	m ⁴⁾	průměr ⁵⁾	m ^{4),6)}	průměr ⁵⁾	m ^{4),6)}	průměr ⁵⁾	m ⁴⁾
<500	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500 - 2000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2001 -10000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3	8
10001 - 100000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
> 100000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

* Neexistence konkrétního emisního standardu nevylučuje možnost stanovení emisního limitu pro daný ukazatel při postupu podle § 5 odst. 2 a 3.

¹⁾ Rozumí se kategorie čistírny odpadních vod vyjádřená v počtu ekvivalentních obyvatel. Ekvivalentní obyvatel (EO) je definovaný produkcí znečištění 60 g BSK₅ za den. Počet ekvivalentních obyvatel se pro účel zařazení čistírny odpadních vod do velikostní kategorie vypočítává z maximálního průměrného týdenního zatížení na přítoku do čistírny odpadních vod během roku s výjimkou neobvyklých situací, přívalových dešťů a povodní. Pro určení velikosti aglomerace se použije stejný postup pro všechny odpadní vody odváděné kanalizací pro veřejnou potřebu. Pro účely stanovení limitů se použije vyšší z obou hodnot. U kategorií COV pod 2000 EO lze použít pro účel zařazení čistírny do velikostní kategorie (v tabulce 1a nebo 1b v příloze č. 1 a v tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení) výpočet z bilance v ukazateli BSK₅ v kg za kalendářní rok na přítoku do čistírny vydělený koeficientem 18,7. U nových ČOV se pro zařazení do velikostní kategorie v prvním roce po výstavbě (zkušební provoz) použije návrhový parametr v zatížení BSK₅. Po prvotním provedení kategorizace je v případě změny zatížení další kategorizace prováděna až s ukončením platnosti povolení k vypouštění odpadních vod.

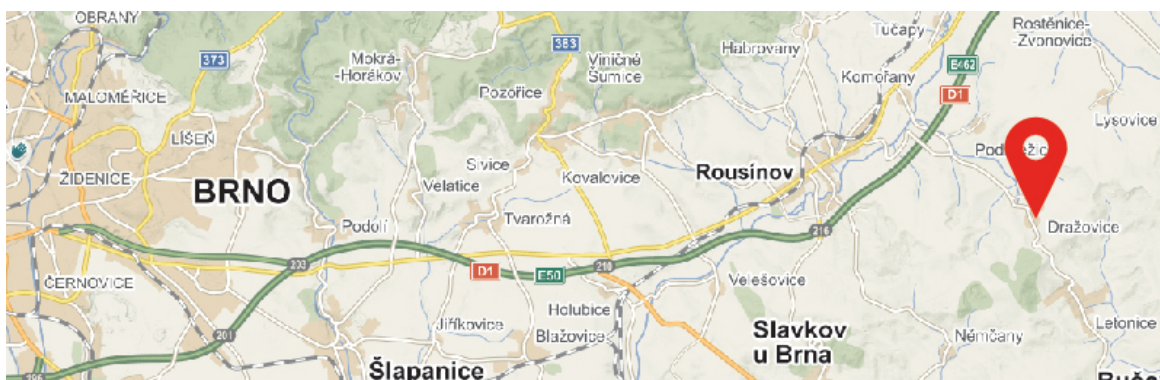
- 2) Celkový dusík je ukazatel, který zahrnuje všechny formy dusíku.
- 3) Uváděné přípustné koncentrace „p“ nejsou aritmetické průměry za kalendářní rok a mohou být překročeny v povolené míře podle hodnot uvedených v příloze č. 5 k tomuto nařízení. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 3) k tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení.
- 4) Uváděné maximální koncentrace „m“ jsou nepřekročitelné. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku uvedený v tabulce 1 přílohy č. 4 k tomuto nařízení v souladu se stanovením hodnoty „p“.
- 5) Uváděné hodnoty jsou aritmetické průměry koncentrací za kalendářní rok a nesmí být překročeny. Počet vzorků odpovídá ročnímu počtu vzorků stanovenému vodoprávním úřadem. Vodoprávní úřad stanoví typ vzorku A nebo B nebo C podle poznámky 3) k tabulce 1 v příloze č. 4 k tomuto nařízení.
- 6) Hodnota platí pro období, ve kterém je teplota odpadní vody na odtoku z biologického stupně vyšší než 12°C. Teplota odpadní vody se pro tento účel považuje za vyšší než 12°C, pokud z pěti měření provedených v průběhu dne byla tři měření vyšší než 12°C. V případě odběru vzorku A nebo prostého vzorku se stanovení teploty provedou v době odběru vzorku.
- 7) Rozbory odtoků z biologických dočišťovacích nádrží zkolaudovaných do 3. 3. 2011 se provádějí ve filtrovaných vzorcích, koncentrace celkových nerozpuštěných látek však nesmí přesáhnout hodnotu 100 mg/l.
- 8) Požadavky na dusík je možno kontrolovat pomocí denních průměrů, jestliže se prokáže, že je takto zajištěna stejná úroveň ochrany vod. V tomto případě denní průměr nesmí přesáhnout 20 mg/l celkového dusíku pro všechny vzorky, jestliže teplota na odtoku biologického stupně čistírny odpadních vod je vyšší nebo rovná 12°C. Zohlednění požadavků na funkci biologického odstranění dusíku a plnění limitů při teplotách na odtoku nižších než 12°C může být nahrazeno zohledněním pro časově určené zimní období podle oblastních klimatických podmínek, které stanoví vodoprávní úřad u tohoto ukazatele znečištění.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část mojí diplomové práce navazuje na výsledky experimentálního výzkumu řešitelského týmu Křiška, Němcová, Hyánková, který byl prováděn v období 27.6.2018 - 21.9.2018 v lokalitě Dražovice, okres Vyškov.

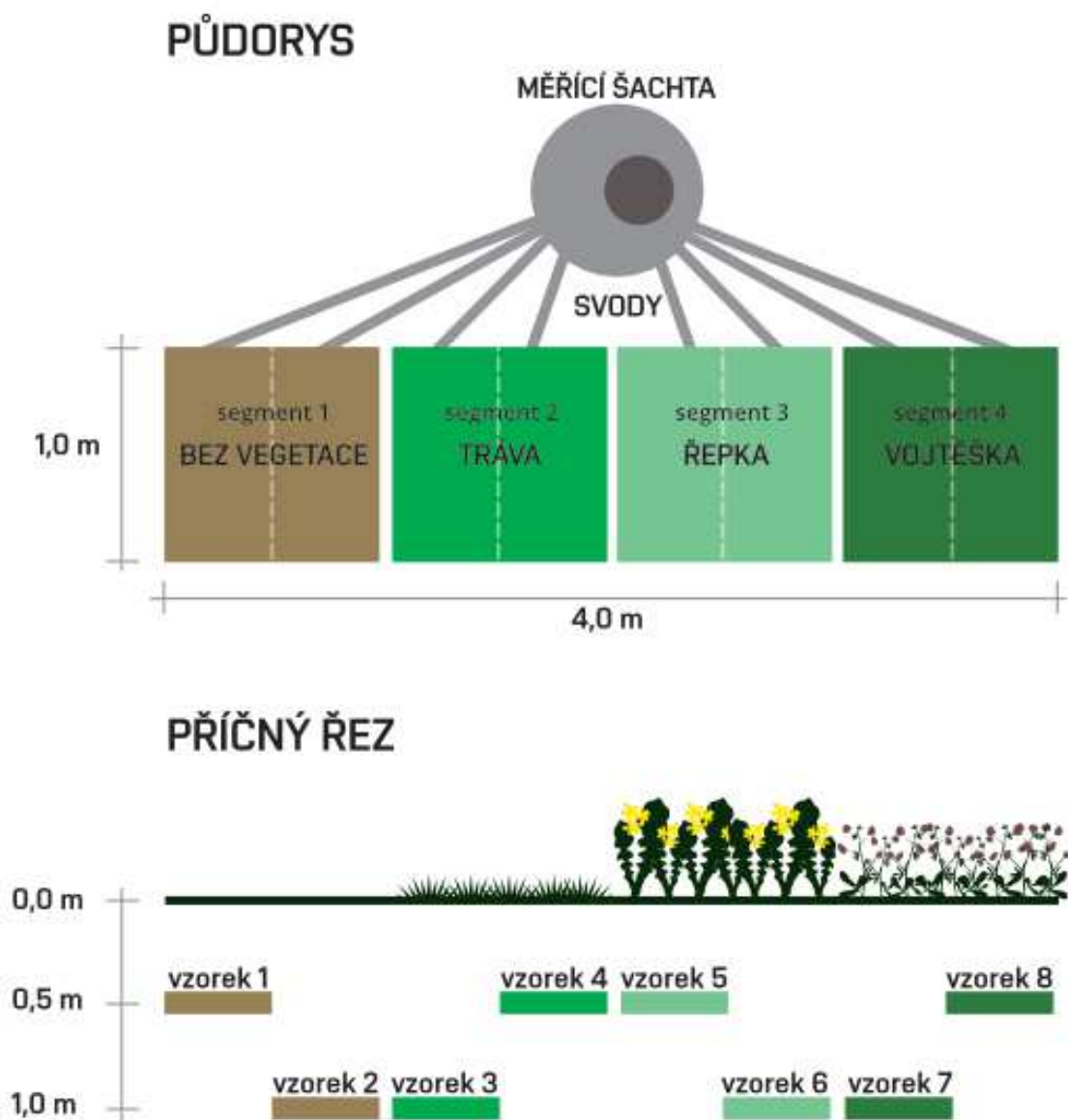
Metodika práce

- Seznámení se s experimentálním měřením, na jehož výsledky navazují
- Zpracování vstupních dat do přehledných tabulek a grafů
- Tvorba modelu v softwaru HYDRUS
- Kalibrace modelu pomocí inverzního řešení z naměřených hodnot
- Aplikace kalibrovaného modelu
- Diskuze výsledků



Obrázek 4 Lokalita Dražovice – okres Vyškov (www.mapy.cz)

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ



Obrázek 5 Schéma měřicího objektu – půdorys a příčný řez

V rámci tohoto experimentu bylo vytvořeno poloprovozní zkušební pole, přičemž zavlažovaná plocha je rozdělená do 4 segmentů, z nichž každý je osázený jinou vegetací. Testovací plochy jsou na povrchu zavlažovány mikropostřikem prostřednictvím mechanicky předčištěné odpadní vody, přičemž dávkování odpadní vody je zajištěno prostřednictvím kalového čerpadla zapojeného v šachtě za horizontálním kalovým polem.

Jako závlahová voda byla použita odpadní voda čištěná pomocí soustavy mechanického předčištění (česle, lapák písku a šterbinová usazovací nádrž) a dvou sériově zapojených horizontálních filtrů s vegetací na KČOV Dražovice. Odběr vody pro závlahu byl umístěn v šachtě před vertikálním filtračním.

Celá zavlažovaná experimentální plocha má velikost 4 m², a je rozdělena na čtyři dílčí segmenty o rozměrech 1 x 1 m. Jednotlivé segmenty byly osety rozdílnými druhy vegetace s výjimkou jednoho, který zůstal bez vegetace. Rozdělení segmentů je patrné z výše uvedeného schématu. Jako vhodné druhy vegetace byly použity technické plodiny: travní směs, řepka olejná a vojtěška setá.

V půdním profilu pod zavlažovanou plochou byly umístěny dvě série sběrných potrubí PP-HT DN 50. První čtyři sběrná potrubí byla umístěna v hloubce 0,5 m, druhá čtyři potrubí pak v hloubce 1 metr pod terénem. Sběrná potrubí byla zaústěna do kruhové šachty, odkud byl později realizován odběr vzorků.

Zavlažovaná plocha byla pod drenážní vrstvou níže položených potrubí odizolovaná, přičemž hydroizolace je spádovaná směrem k odtokovému profilu tak, aby se zajistil co největší odtok průsakové vody.



Obrázek 6 Realizace zkušebního zařízení (foto: M. Křiška)



Obrázek 7 Realizace zkušebního zařízení (foto: M. Křiška)



Obrázek 8 Rozvod postřikovače (vlevo), aplikace závlahy postřikovačem (vpravo) (foto: M. Křiška)



Obrázek 9 Vzrostlá vegetace na osetých segmentech v závěru experimentu (foto: M. Křiška)

Zvoleným typem závlahového systému byla závlaha postřikovačem, který byl spínán časovačem v časových intervalech 5 x 1 minuta. Úhrn závlahové vody byl stanoven měřením

při zapnutém zavlažování sběrem do nádoby se známou půdorysnou plochou. Průměrná hodnota závlahové dávky činila 13,76 mm/den. Pro potřeby získání vzorků průsakové vody v požadovaných hloubkách bylo nutné zvolit takto vysokou závlahovou dávku.

Vzorky vody pro analýzu byly odebírány ze sběrné šachty přibližně ve dvou týdenních intervalech po dobu tří měsíců. Chemická analýza vzorků byla prováděna spektrofotometricky pomocí kyvetových testů v laboratoři VHK.

3.2 SRÁŽKY

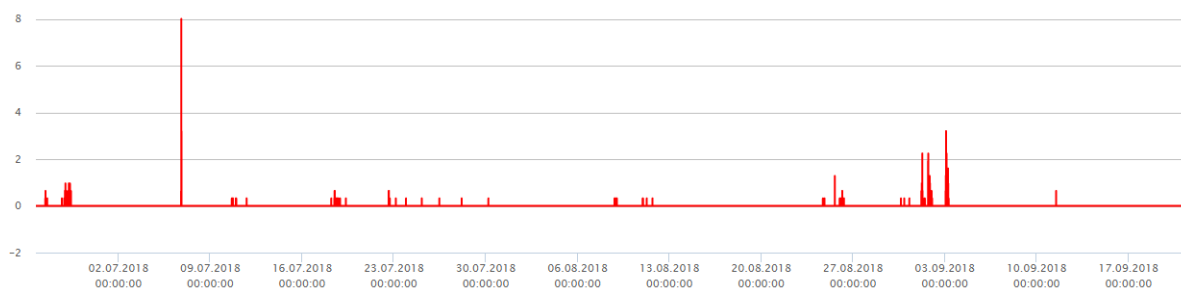
Pro zhodnocení nutnosti uvažovat v modelu srážkovou vodu, která by způsobila naředění koncentrace závlahové vody, byla použita data z mapy meteorologických stanic MeteoUNI s GSM přenosem od společnosti AMET - sdružení Litschmann & Suchý dostupné z www.amet.cz.



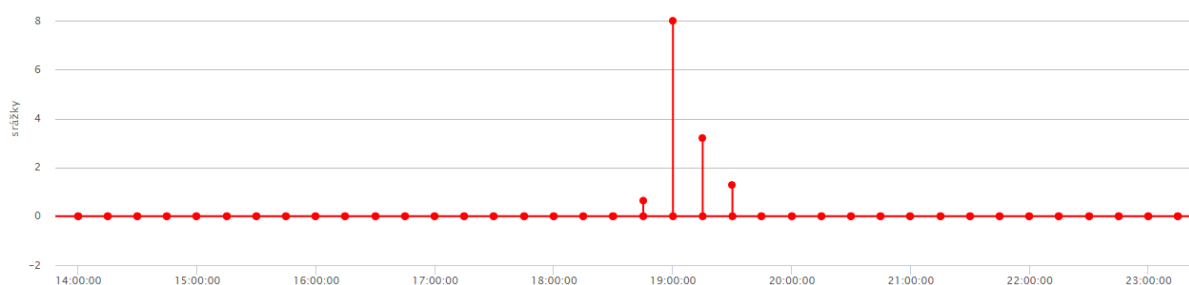
Obrázek 10 Mapa meteorologických stanic. Zdroj: www.amet.cz

Nejbližší meteorologická stanice od obce Dražovice se nachází v Rousínově, vzdušnou vzdáleností 5,2 km.

Maximální srážka v celém období dosáhla hodnoty 8 mm, trvala však pouhých 15 minut. Ostatní srážky, které jsou relativně rovnoměrné v čase, nedosahují až na výjimky ani 1 mm vodního sloupce. Z toho důvodu jsem se rozhodla ve vytvořeném modelu neuvažovat žádnou balastní vodu, jejíž vliv by byl vzhledem k malé velikosti zanedbatelný.



Obrázek 11 Rozložení a velikost srážek v celém sledovaném období Zdroj: www.amet.cz

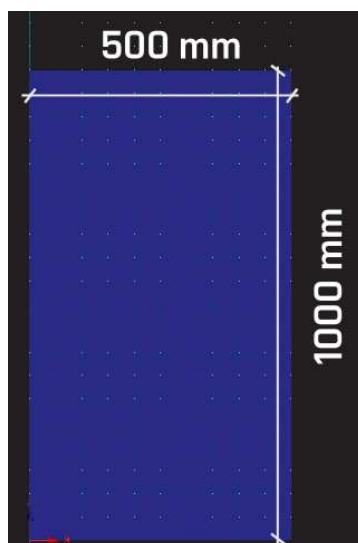


Obrázek 12 Maximální srážka naměřená 6. 7. 2018 Zdroj: www.amet.cz

3.3 TVORBA MODELU

3.3.1 Geometrie modelu

Základem modelu je definice jeho geometrie – tvaru, sklonu, rozměrů a počet dimenzí modelu. V našem případě byl zvolen dvourozměrný typ geometrie s horizontální a vertikální složkou XZ. Jedná se o obdélníkový tvar s rozměry 1000 x 500 mm, což je dáno rozměry skutečných zkušebních prvků.

**Obrázek 13** Nastavení geometrie modelu

3.3.2 Simulační procesy

V dialogovém okně hlavních simulačních procesů byly v našem případě zvoleny simulace proudění vody a simulace transportu látek. V této fázi je také třeba zvolit, že chceme použít inverzní řešení – tedy že z naměřených výstupů chceme modelovat průběh. Tento postup byl použit vždy v první fázi kalibrace modelu. Po kalibraci a získání potřebných koeficientů již inverzní řešení nebylo použito.

3.3.3 Časově proměnné okrajové podmínky

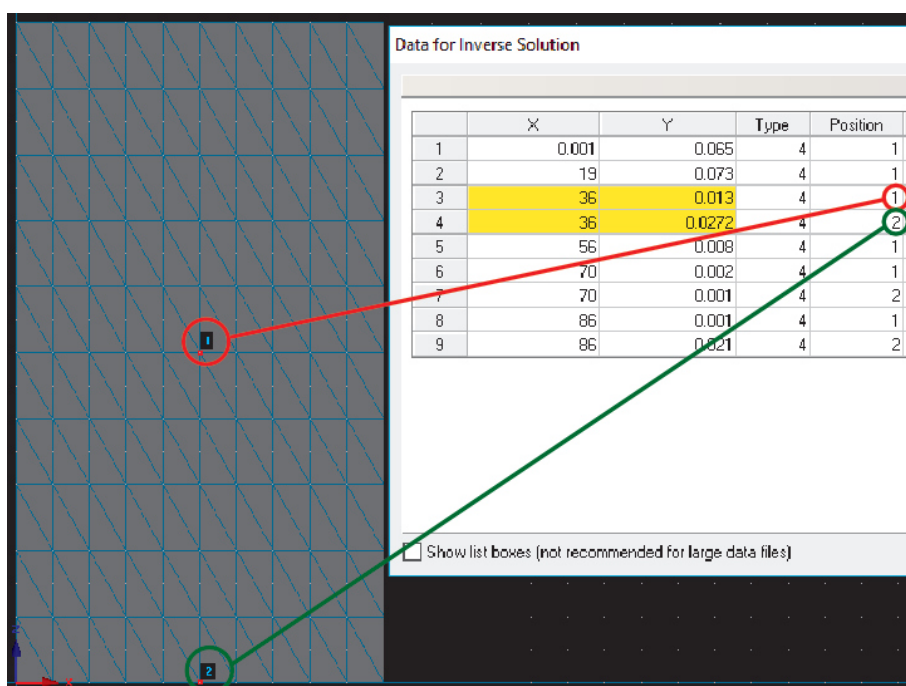
Je třeba zkontrolovat, že je vybrána možnost časově proměnných okrajových podmínek (Time-Variable Boundary Condition), které v našem případě znamenají časově proměnné koncentrace znečištění na přítoku.

3.3.4 Časové charakteristiky

Experimentální měření probíhalo v období 27.6.2018 – 21.9.2018, tj. 86 dní. Z toho důvodu byl i v našem modelu ve fázi kalibrace nastaven konečný čas 86 dní. Pro následné modelování byl zvolen jednoletý časový interval (365 dní).

3.3.5 Data pro inverzní řešení

Zdrojem dat pro inverzní řešení jsou výsledky experimentálního měření. V softwaru je nutné nadefinovat, v jakém bodě modelu byla tato data získaná, a jejich hodnotu. V našem případě byly zvoleny 2 pozorovací body. Bod č.1 se nachází v půlmetrové hloubce a bod č. 2 v metrové hloubce. Pro kalibraci simulace transportu rozpuštěných látek byly použity naměřené hodnoty na odtoku z experimentálních dat.



Obrázek 14 Příklad nastavení dialogového okna dat pro inverzní řešení

3.3.6 Hydraulické parametry půdy

V našem případě byla vybrána půda z katalogu půd softwaru Hydrus. Byla uvažována jílová hlína (clay loam), která po konzultaci s řešitelským týmem nejvíce odpovídá půdě v místě měření. Rozbory půdy nebyly provedeny. V celém modelu byl nastaven pouze jediný druh půdy.

3.3.7 Volba hydraulického modelu

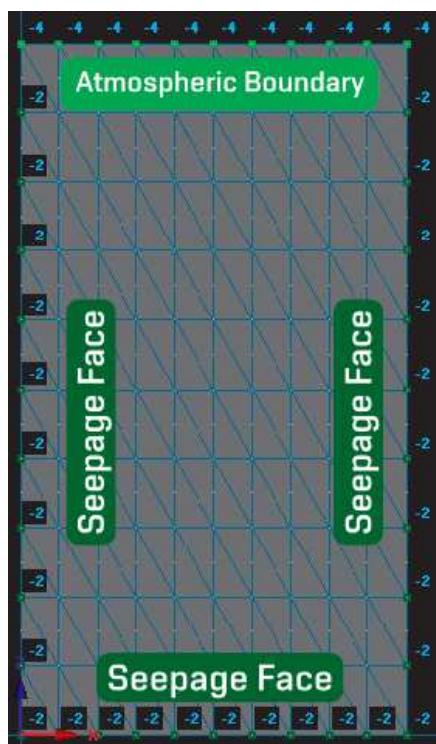
V této fázi je nutné vybrat výpočetní model pro simulaci proudění. V našem případě byl zvolen simulační model van Genuchten-Mualem, který vyžaduje rozhodnout o hysterezi systému. Byla zvolena možnost bez hystereze, při které jsou vstupní veličiny nezávislé na předchozím stavu.

3.3.8 Počáteční podmínky

Počáteční podmínky charakterizují stav v řešené oblasti v počátečním čase $t=0$. V případě mnoha řešených modelů byla jako počáteční podmínka stanovena počáteční koncentrace příslušného znečištění v celé oblasti. Aby byla kalibrace modelu co nejpřesnější, byla počáteční koncentrace vždy stanovena jako hodnota blízká znečištění přitékající závlahové vody.

3.3.9 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky definují chování modelu v okrajových částech. Na horní hranici (zemský povrch) byla stanovena atmosférická okrajová podmínka (Atmospheric Boundary), v nápovědě k softwaru HYDRUS se uvádí, že při výpočtu s atmosférickou podmínkou dochází k přepínání mezi Neumannovou tokovou okrajovou podmínkou a Dirichletovou tlakovou okrajovou podmínkou. K aplikaci tlakové podmínky dojde, pokud je známý tlak na hranici a k aplikaci tokové okrajové podmínky, pokud je známý tok, například přísun závlahové vody. Druhou zvolenou okrajovou podmínkou byla Seepage face a to jak na dolním okraji tak na svislých stěnách. Tato podmínka udává, že dokud nedojde k nasycení zóny, nedochází přes ni k průsaku. V momentu nasycení dojde ke změně a voda je přes tuto hranici odváděna pryč. [Šejna, Šimůnek, van Genuchten, 2011].



Obrázek 15 Nastavení okrajových podmínek v inverzním modelu

3.4 ZNEČIŠTĚNÍ $\text{NH}_4^+\text{-N}$

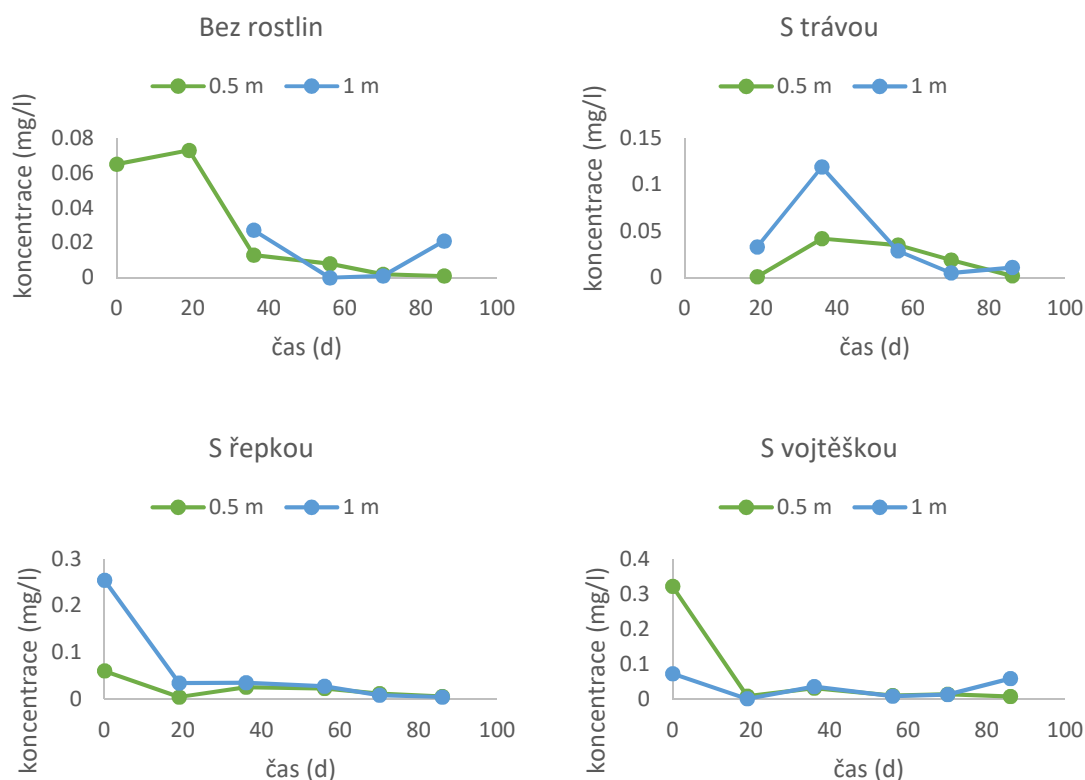
Amoniakální dusík je jedním ze sledovaných ukazatelů, který podléhá Nařízení vlády 401/2015 Sb. Toto nařízení udává přípustné a maximální hodnoty koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod. Tabulka jednotlivých ukazatelů je v Příloze 1 této práce.

Amoniakální dusík je primárním produktem rozkladu organických dusíkatých látek, a to jak rostlinného, tak živočišného původu. Proto jsou významným zdrojem amoniakálního dusíku městské splaškové vody a odpady ze zemědělských výroby. Dalším antropogenním zdrojem mohou být splachy ze zemědělsky využívaných ploch, která jsou hnojena dusíkatými hnojivy. [Pitter, 2009] Amoniakální dusík se vyskytuje ve všech druzích vod, v přírodních vodách v řádech desetin mg/l, v městských odpadních vodách v řádech desítek mg/l a v některých průmyslových vodách (zejména ze zemědělství) až stovky mg/l. [Horáková, 2003]

3.4.1 Vstupní hodnoty

Tabulka 3 Hodnoty $\text{NH}_4^+\text{-N}$ změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$									
		zkušební segment							
		bez rostlin		s trávou		s řepkou		s vojtěškou	
		odběr v hloubce		odběr v hloubce		odběr v hloubce		odběr v hloubce	
čas	na přítoku	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m
dny od počátku	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
0	50.6	-	0.065	-	-	0.255	0.06	0.072	0.322
19	50.8	-	0.073	0.033	0.001	0.034	0.004	0.0001	0.008
36	43.4	0.027	0.013	0.119	0.042	0.035	0.025	0.035	0.031
56	62.2	-	0.008	0.029	0.035	0.027	0.022	0.008	0.01
70	30.3	0.001	0.002	0.005	0.019	0.008	0.011	0.012	0.013
86	48.4	0.021	0.001	0.011	0.002	0.004	0.005	0.058	0.007



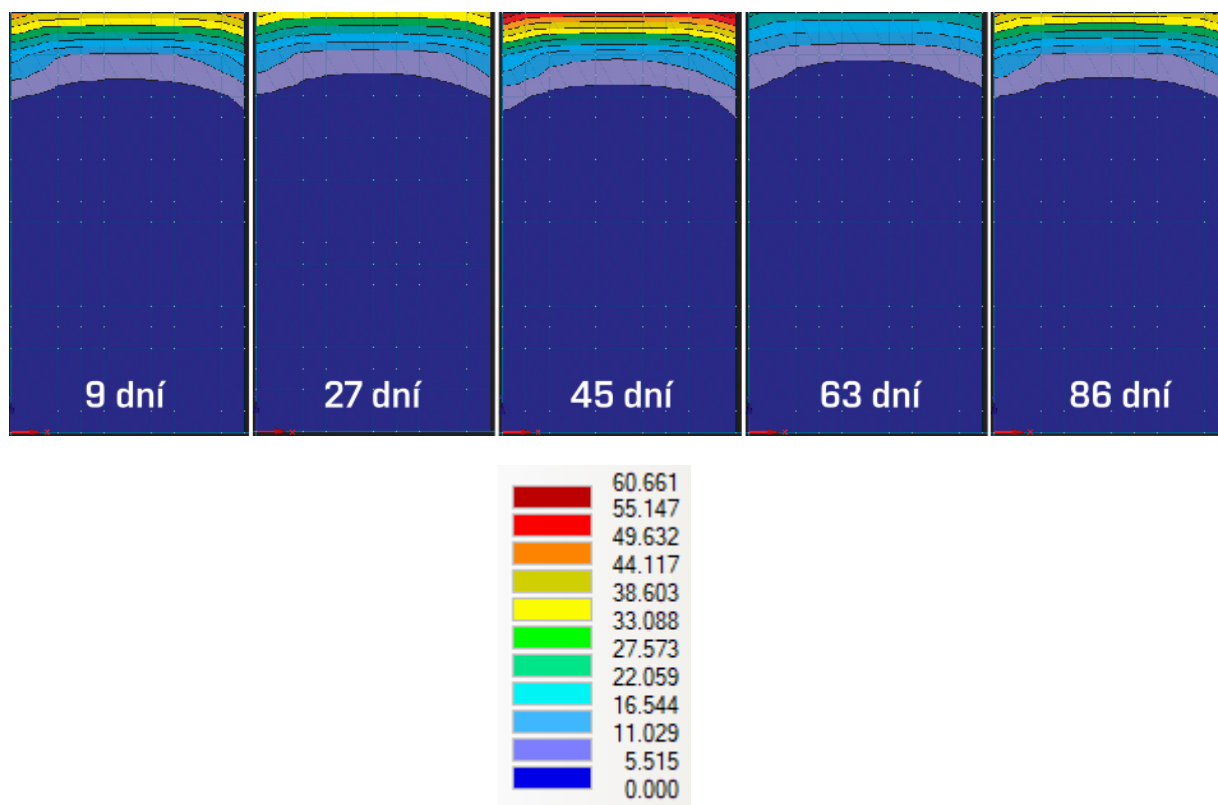
Graf 4 Grafické znázornění vývoje koncentrace $\text{NH}_4^+\text{-N}$ v čase

3.4.2 Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty

3.4.2.1 Segment bez vegetačního pokryvu

Počáteční koncentrace znečištění byla nastavena na hodnotu 0,06 mg/l.

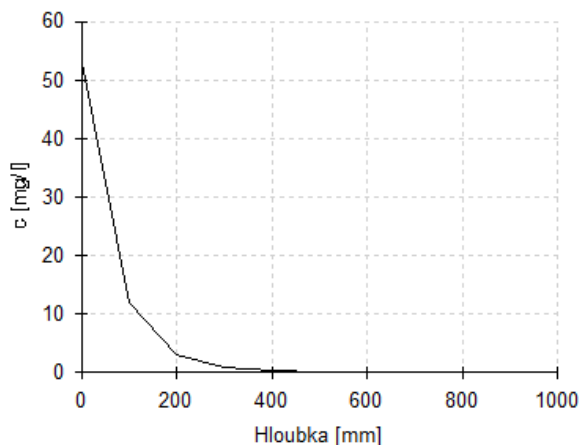
Jako problematické se v tomto segmentu jeví nedostatek vstupních (naměřených) dat z pozorovacího bodu v hloubce jednoho metru. Pravděpodobně v důsledku nedostatku srážkového množství na začátku experimentu nedošlo k prostoupení závlahové vody do hloubky 1 m a tudíž nemohla být určena hodnota znečištění. Ze 6 sledovaných intervalů tak máme ke kalibraci modelu k dispozici pouze 3 naměřené hodnoty. To má velmi negativní vliv na přesnost výsledného modelu.



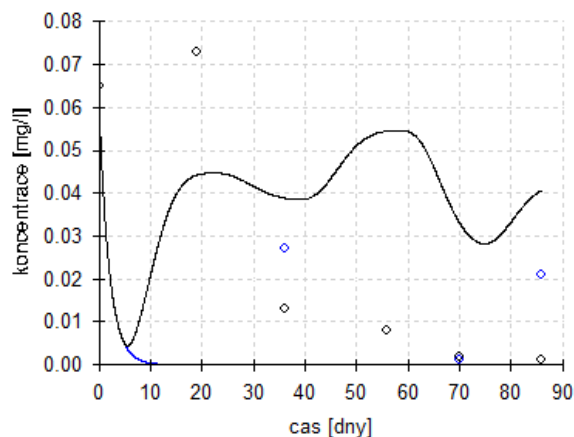
Obrázek 16 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace

Z grafických výstupů programu HYDRUS je patrné, že v celém časové intervalu 0 – 86 dní nedochází k žádným velkým výkyvům znečištění. V čase, kdy znečištění viditelně zasahuje do největší hloubky, je již pod úrovní 40 cm znečištění blíží se nule.

Koncentrace NH_4^+-N , Cas 6 - 54.0 dní



Pozorovací body: Koncentrace

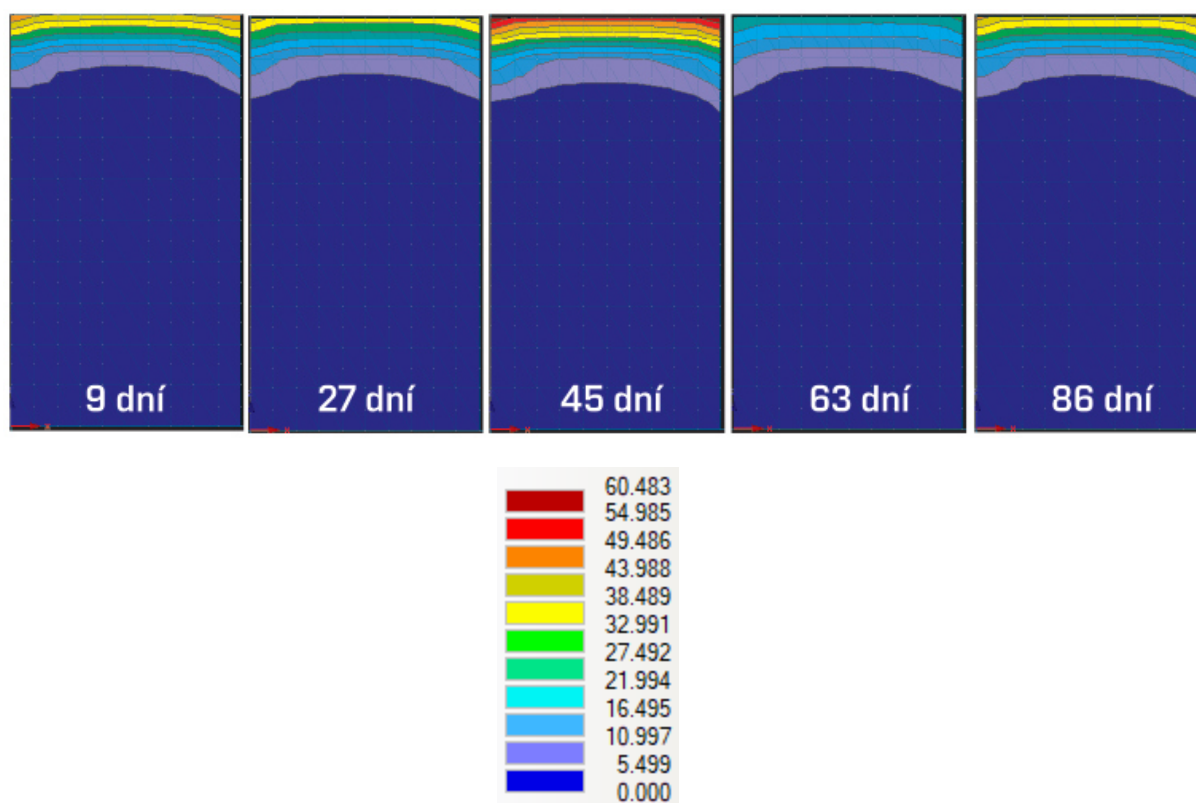


Graf 5 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění NH_4^+-N v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

3.4.2.2 Segment s travním porostem

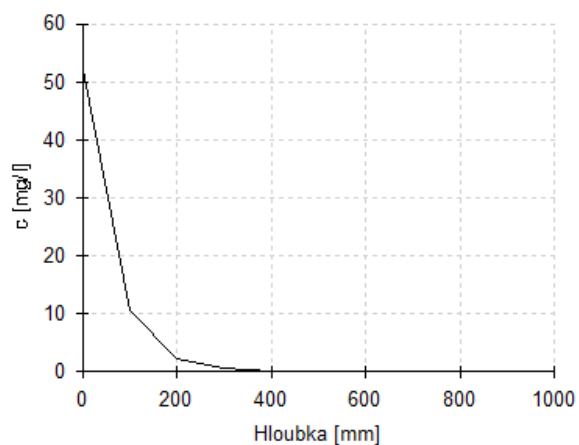
Počáteční koncentrace znečištění byla ponechána na hodnotě 0,06 mg/l. U tohoto segmentu hodnotím jako problematickou hodnotu znečištění 36.den v pozorovacím bodě v 1 m hloubky. Přestože znečištění na přítoku je velmi podobné po celou dobu pokusu, měřené znečištění na odtoku se nárazově zvýšilo o celý řád (0,119 mg/l). To se dá vysvětlit například zkratkovitými proudy nebo jinými nepopsanými skutečnostmi. Tato skutečnost však může mít negativní dopad na kalibraci modelu.

Průběhy znečištění se v grafickém zobrazení zdají na první pohled velmi podobné se segmentem bez vegetace. Rozdíly můžeme však vidět u průběhů kalibračních křivek.

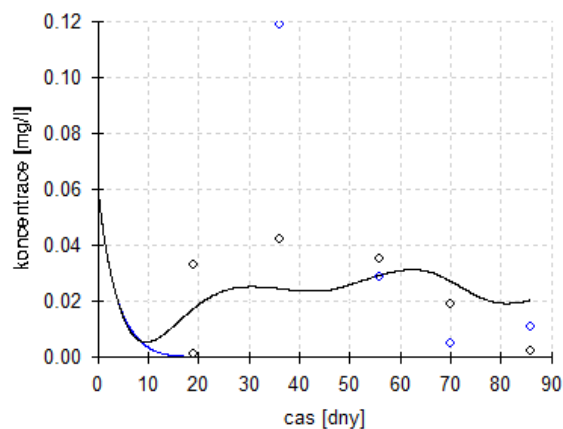


Obrázek 17 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem

Koncentrace, čas 6 - 54.0 dní

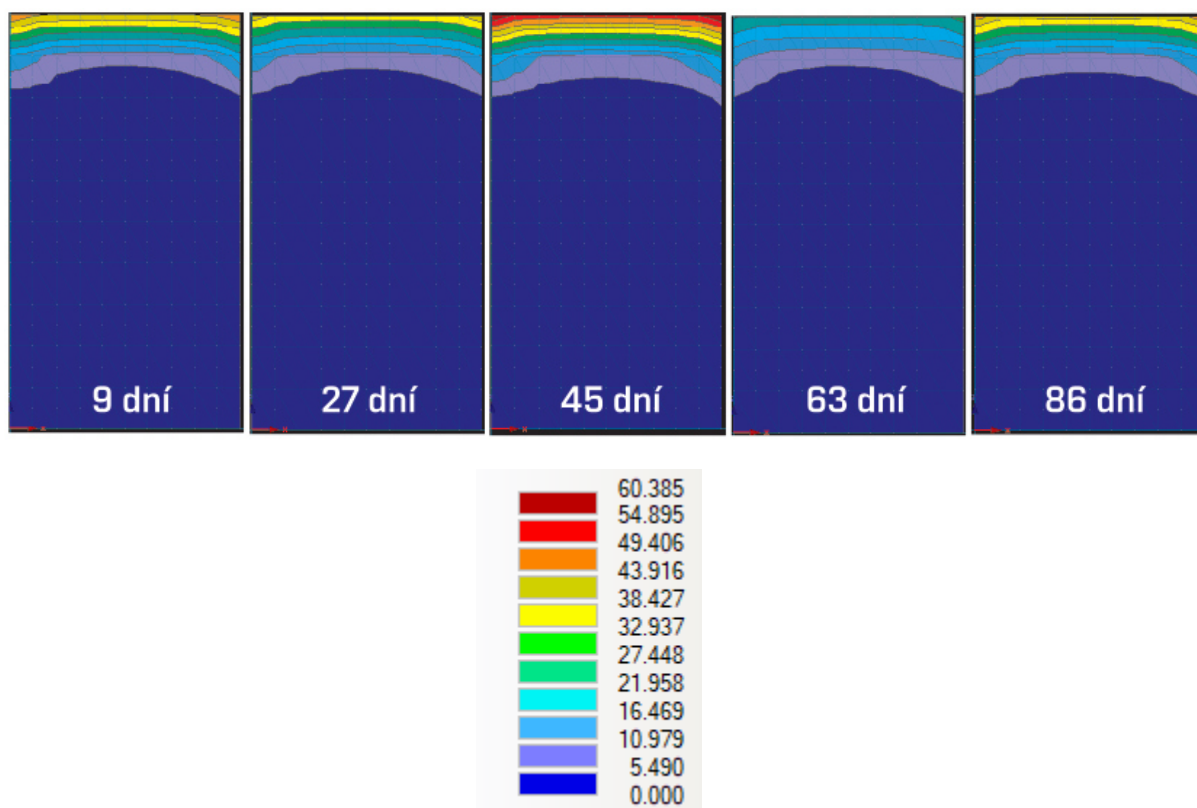


Pozorovací body: Koncentrace



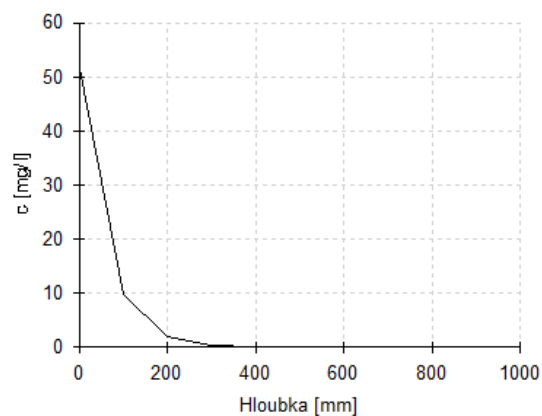
Graf 6 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

3.4.2.3 Segment s řepkou olejnou

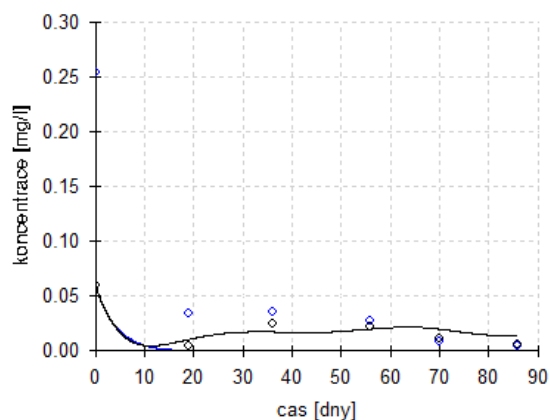


Obrázek 18 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou

Koncentrace, čas 6 - 54.0 dní

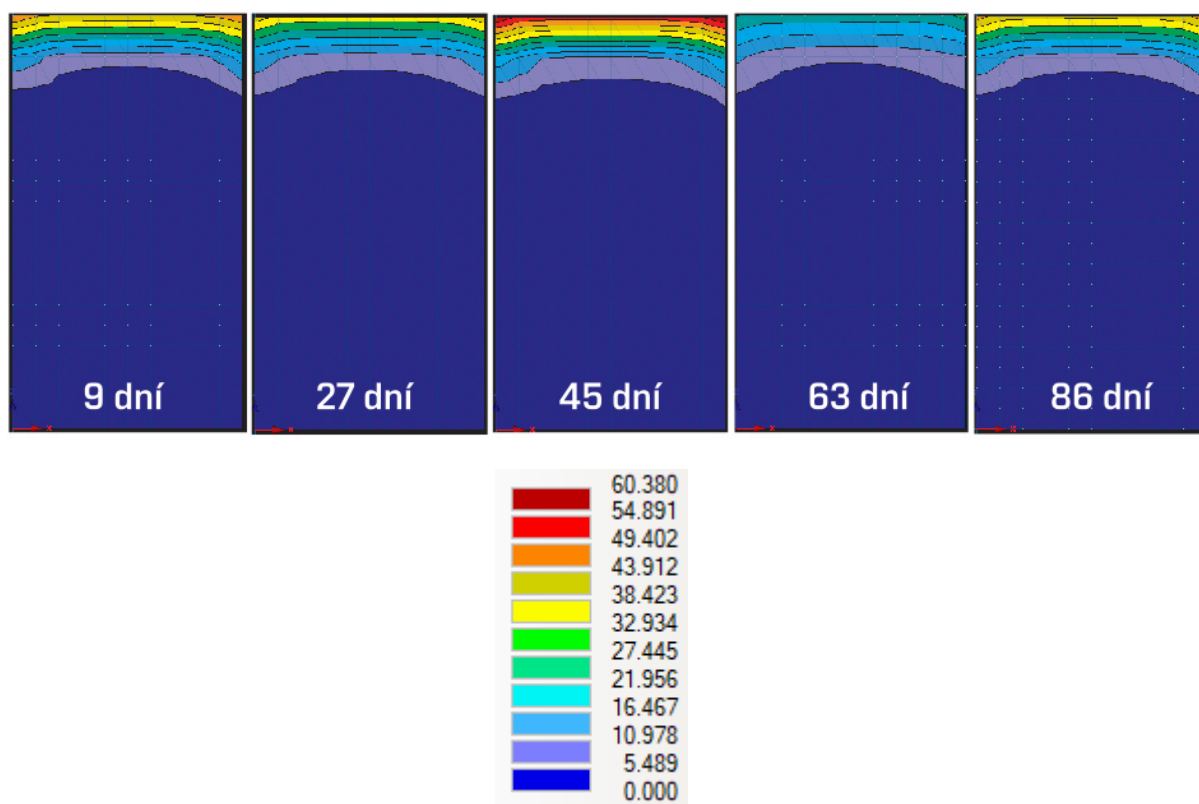


Pozorovací body: Koncentrace



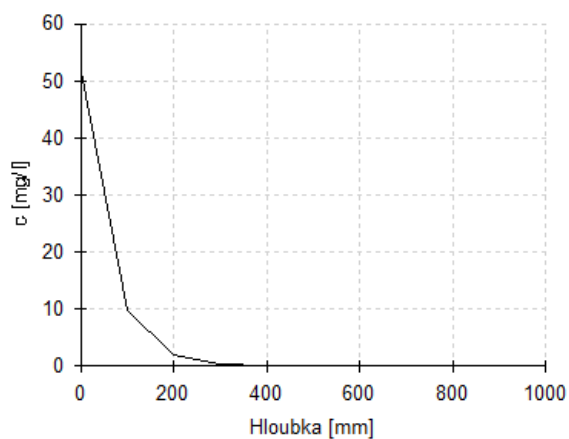
Graf 7 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

3.4.2.4 Segment s vojtěškou setou

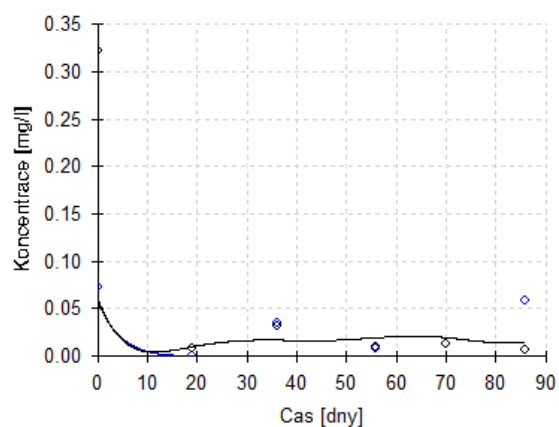


Obrázek 19 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou

Koncentrace, čas 6 - 54.0 dní



Pozorovací body: Koncentrace



Graf 8 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění NH₄⁺-N v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

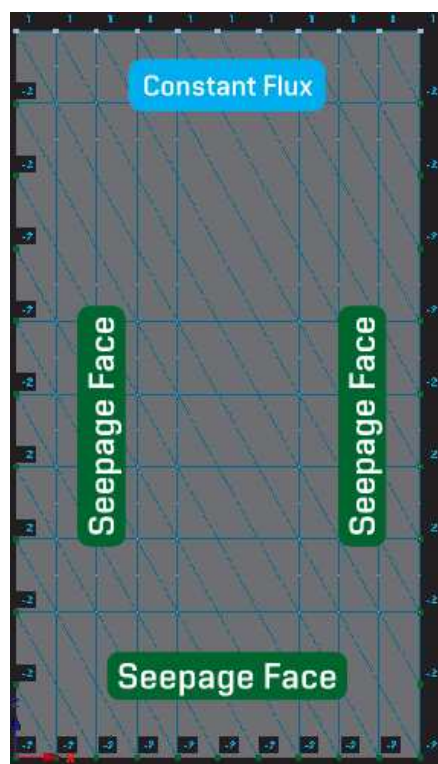
3.4.3 Koeficienty z kalibračních modelů

Tabulka 4 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$

	zkušební segment			
	bez vegetace	s trávou	s řepkou	s vojtěškou
KD	3.62E-03	3.08E-01	2.27E-01	2.35E-01
SNKL1	5.23E-01	5.58E-01	5.84E-01	5.84E-01

3.4.4 Zkalibrované modely znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$

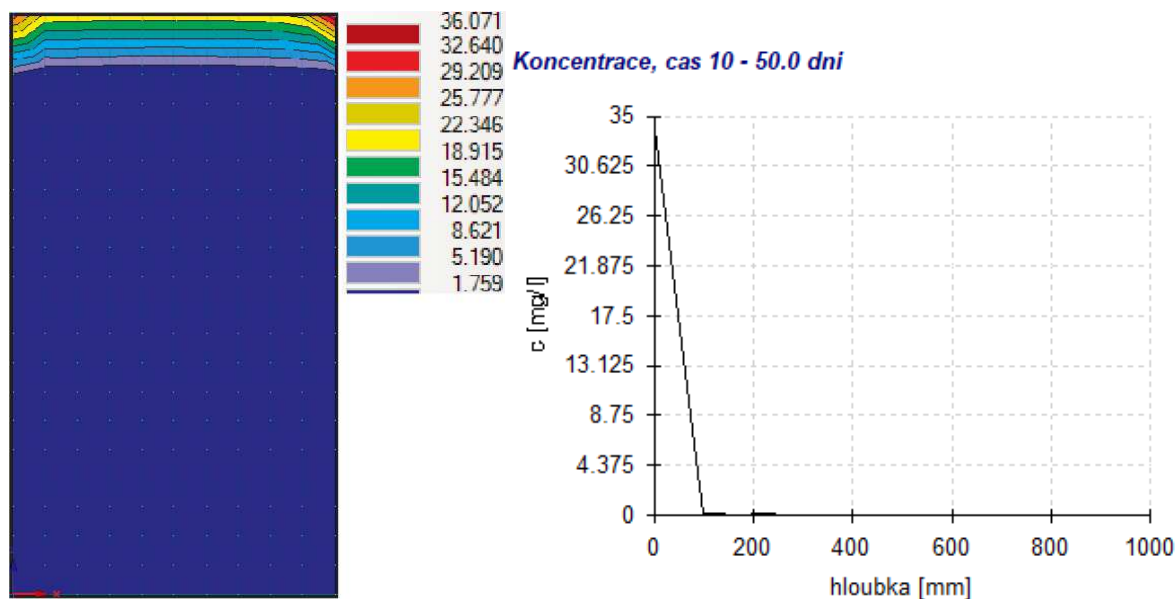
Při tvorbě nového modelu byla změněna okrajová podmínka na horním okraji na konstantní přítok (Constant Flux). V každém segmentu byl tento přítok nastaven na hodnotu, která odpovídá požadované závlahové dávce dané vegetace. Ostatní parametry zůstaly nezměněny. Model byl vytvořen pro období jednoho kalendářního roku, tedy 365 dní.



Obrázek 20 Nastavení okrajových podmínek v modelu

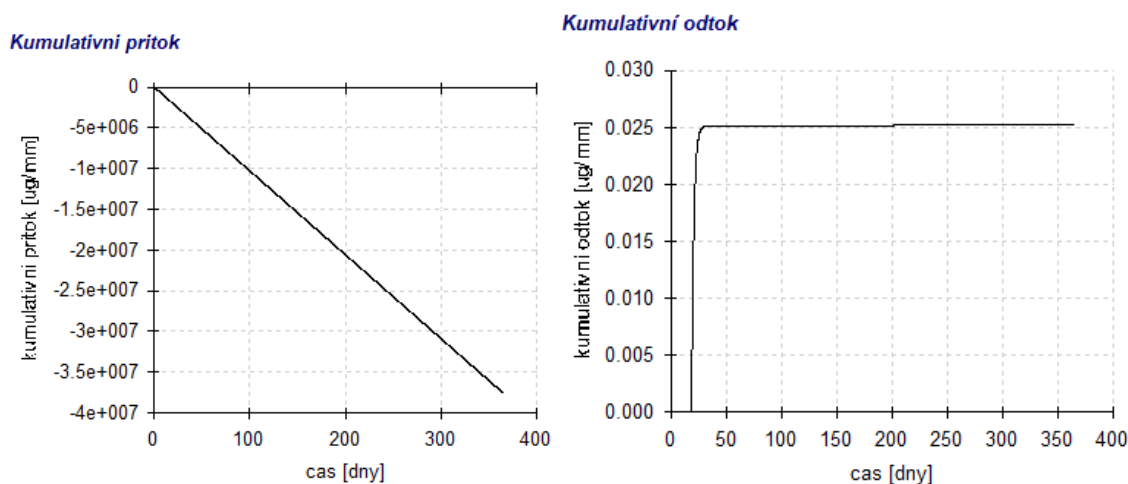
3.4.4.1 Segment bez vegetačního pokryvu

Pro segment bez vegetačního pokryvu byla uvažována stejná závlahová dávka, jako pro segment s travním porostem. Její výpočet se nachází v příslušné kapitole níže, použitá hodnota je 4,29 mm/den. Koncentrace na přítoku byla nastavena na 40 mg/l, což přibližně odpovídá průměrnému znečištění na přítoku při experimentálním měření.



Obrázek 21 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (50.den)

Od úrovně hloubky 10 cm již obsah $\text{NH}_4^+\text{-N}$ se již hodnota znečištění blíží nule.



Graf 9 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Rozdílem koncových hodnot kumulativního přítoku a odtoku získáváme představu o množství rozloženého amoniakálního dusíku na 1 m². Za 365 dní je na této ploše zachyceno asi 75 g NH₄⁺-N.

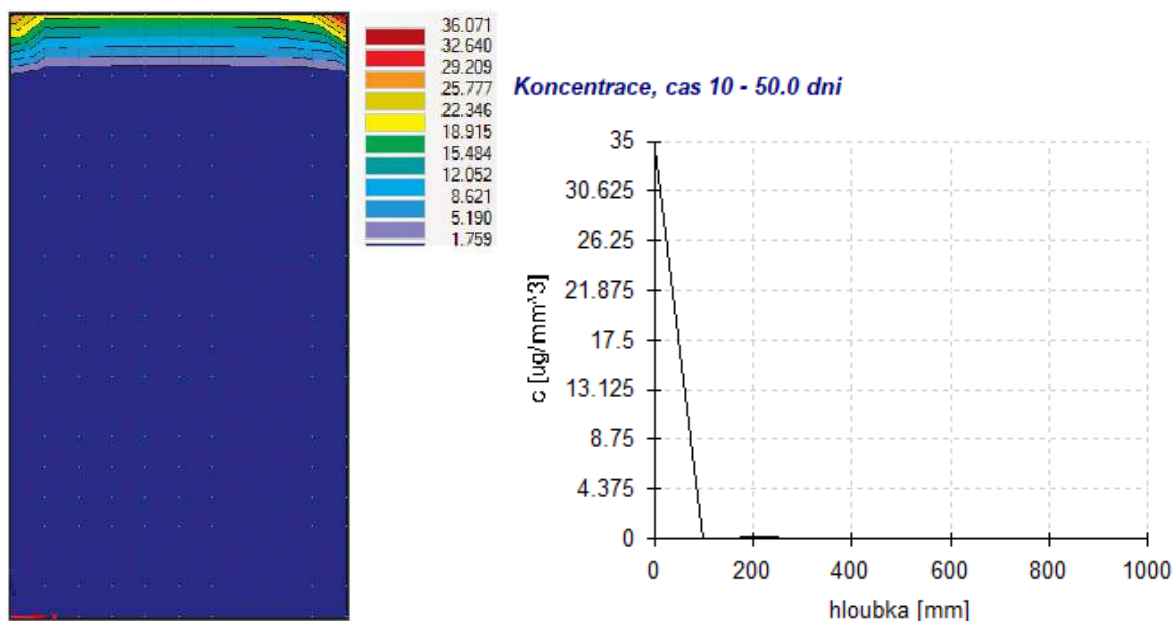
3.4.4.2 Segment s travním porostem

Dodávaná závlahová dávka pro trvalé travní porosty byla stanovena následovně.

Tabulka 5 Výpočet závlahové dávky pro trvalé travní porosty

trvalé travní porosty		
vegetační období	15.duben - 15.září	20 týdnů
týdenní závlahová dávka	25-40 l/m ² [Králová,2005]	30 mm/týden
		4.29 mm/den

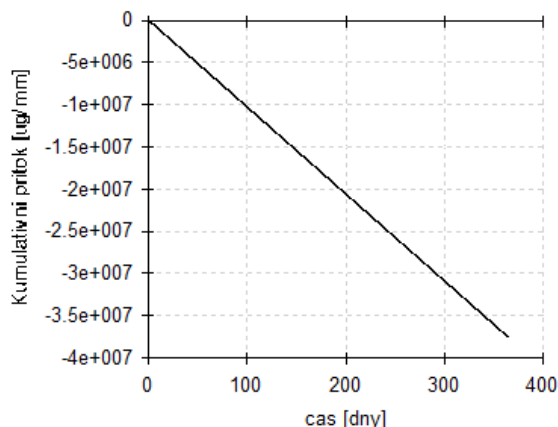
S ohledem na období s velmi nízkými úhrny srážek byl zvolen scénář, při kterém jsou přirozené dešťové srážky zanedbány a závlahová dávka pokrývá 100% vláhové potřeby vegetace.



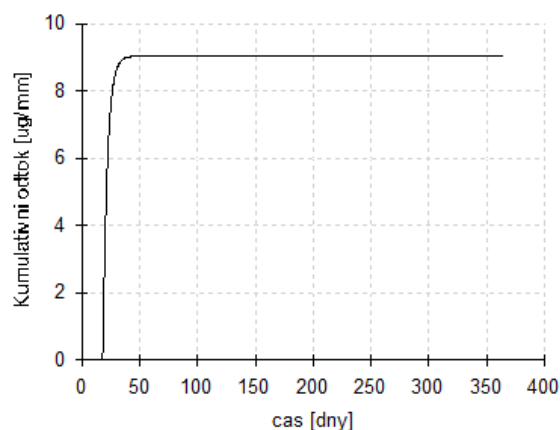
Obrázek 22 Průběh znečištění NH₄⁺-N po ustálení (20.den)

Výsledky jsou velmi podobné výsledkům modelu bez vegetačního krytu. Ukazuje se, že přítomnost vegetačního krytu ve formě travního porostu zřejmě nemá zásadní vliv na schopnost segmentu odbourat znečištění NH₄⁺-N.

Kumulativní přítok



Kumulativní odtok



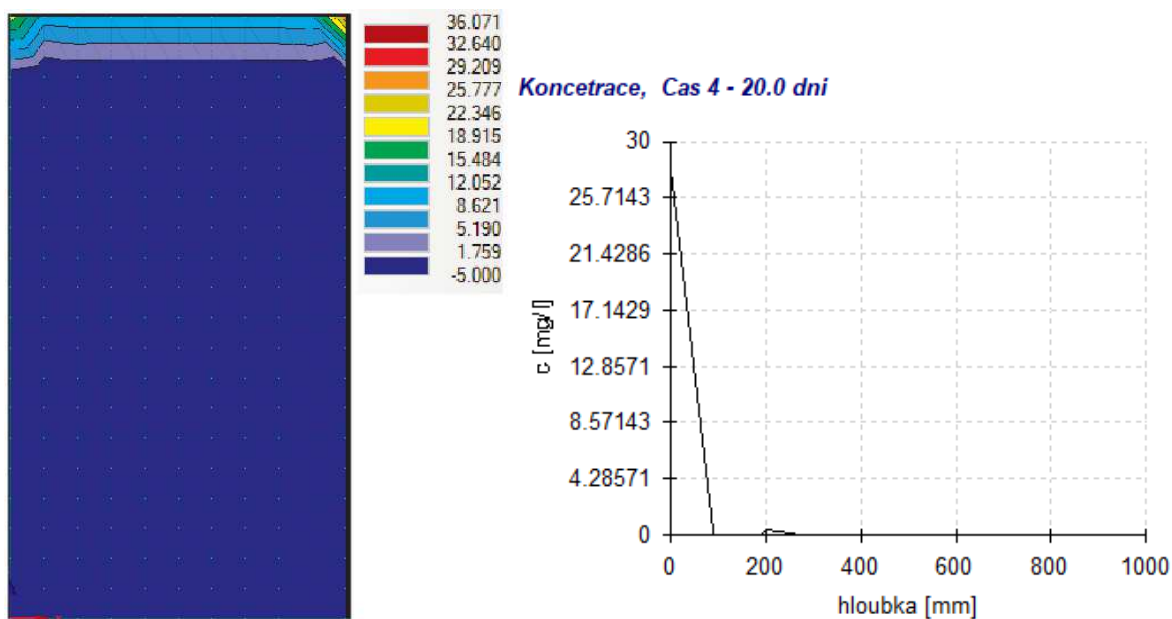
Graf 10 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Rozdílem koncových hodnot kumulativního přítoku a odtoku získáváme představu o množství rozloženého amoniakálního dusíku na 1 m^2 . Za 365 dní je na této ploše zachyceno asi $75 \text{ g NH}_4^+\text{-N}$. Téměř totožný výsledek s předchozím segmentem je dán především stejnou závlahovou dávkou o stejné koncentraci znečištění.

3.4.4.3 Segment s řepkou olejnou

Tabulka 6 Výpočet závlahové dávky pro řepku olejnou

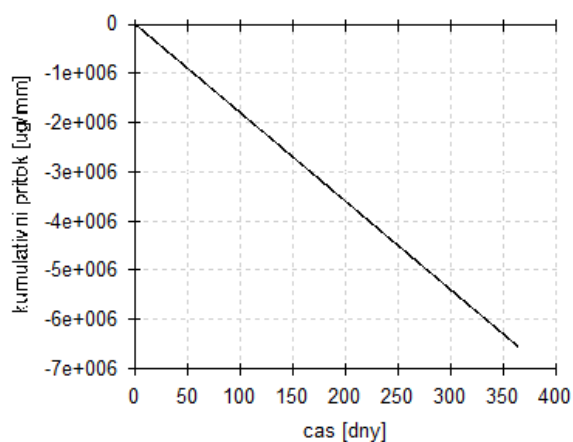
řepka olejná		
vegetační období	http://www2.zf.jcu.cz	120 dnů
týdenní závlahová dávka	$2400 \text{ m}^3/\text{ha}$ ČSN 75 0434	240 mm/vs
		2.00 mm/den



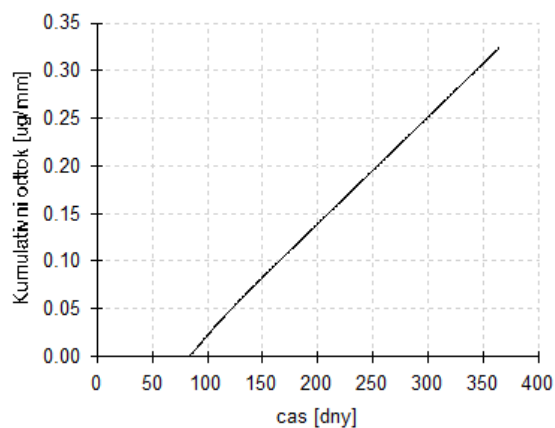
Obrázek 23 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (20.den)

V hloubce 10 cm je znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ blíží se nule.

Kumulativní přítok



Kumulativní odtok



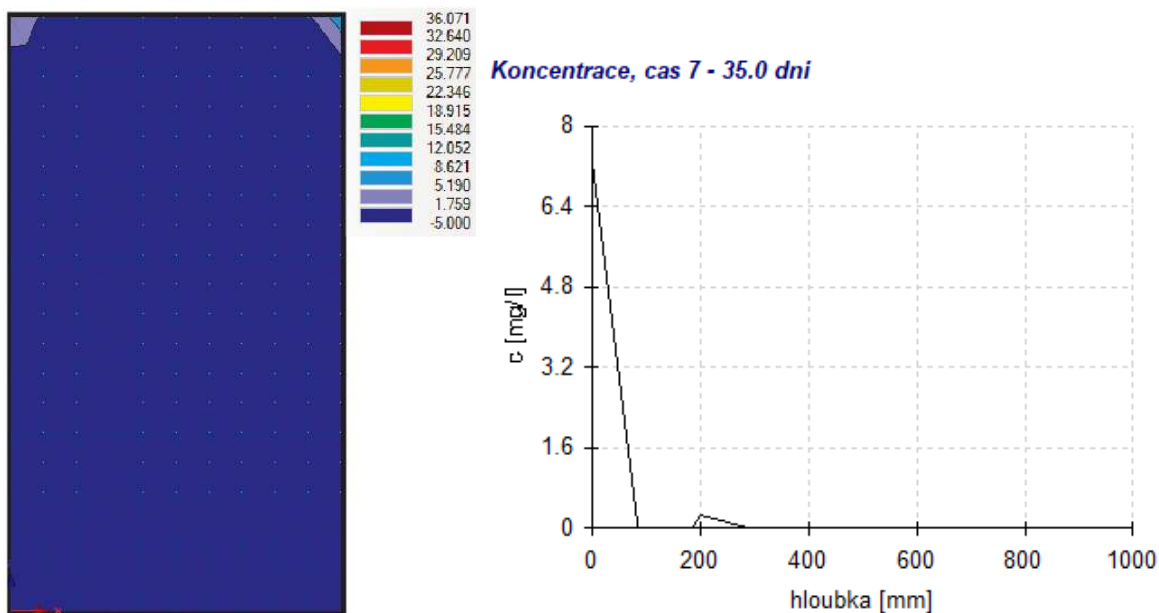
Graf 11 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech $13,1 \text{ g/m}^2$.

3.4.4.4 Segment s vojtěškou setou

Tabulka 7 Výpočet závlahové dávky pro vojtěšku setou

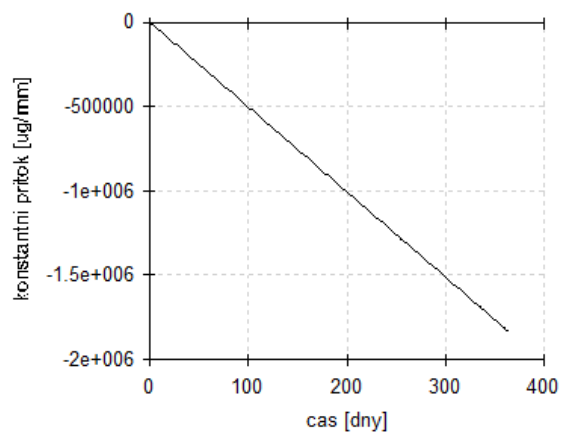
vojtěška setá		
vegetační období	https://voda.tzb-info.cz	190 dnů
týdenní závlahová dávka	400 m ³ /ha ČSN 75 0434	40 mm/vs
		0.21 mm/den



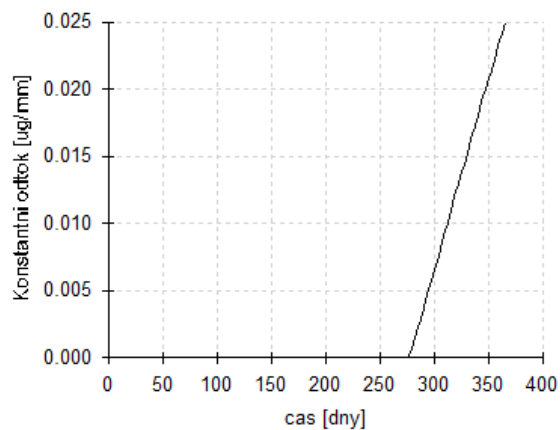
Obrázek 24 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (35.den)

Při závlahové dávce 0,21 mm/den je modelované znečištění natolik malé, že při zachování jednotné barevné škály je z grafického výstupu těžko rozpoznatelné. Z příčného řezu čteme maximální hodnotu znečištění těsně pod úrovní terénu 7,31 mg/l.

Konstantní přítok



Konstantní odtok



Graf 12 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech je $3,4 \text{ g/m}^2$ rozloženého $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

3.5 ZNEČIŠTĚNÍ P-PO₄⁻³

Celkový fosfor se ve vodách vyskytuje ve dvou formách – jako anorganické sloučeniny (P_{anorg}) nebo organické sloučeniny (P_{org}). Nejčastější formou výskytu jsou orthofosforečnany. Z fyzikálního hlediska pak lze celkový fosfor rozdělit na rozpuštěný a nerozpuštěný. [Horáková, 2003] Organický fosfor pochází z živočišných odpadů, 1 obyvatel vyloučí denně asi 1,5 g fosforu, který se dostává do splaškové vody. Pokud se k této produkci připočítají fosforečnany uvolňující se z pracích prostředků, dostáváme se na specifickou spotřebu asi 2 - 3 g/os/den. [Pitter, 2009]

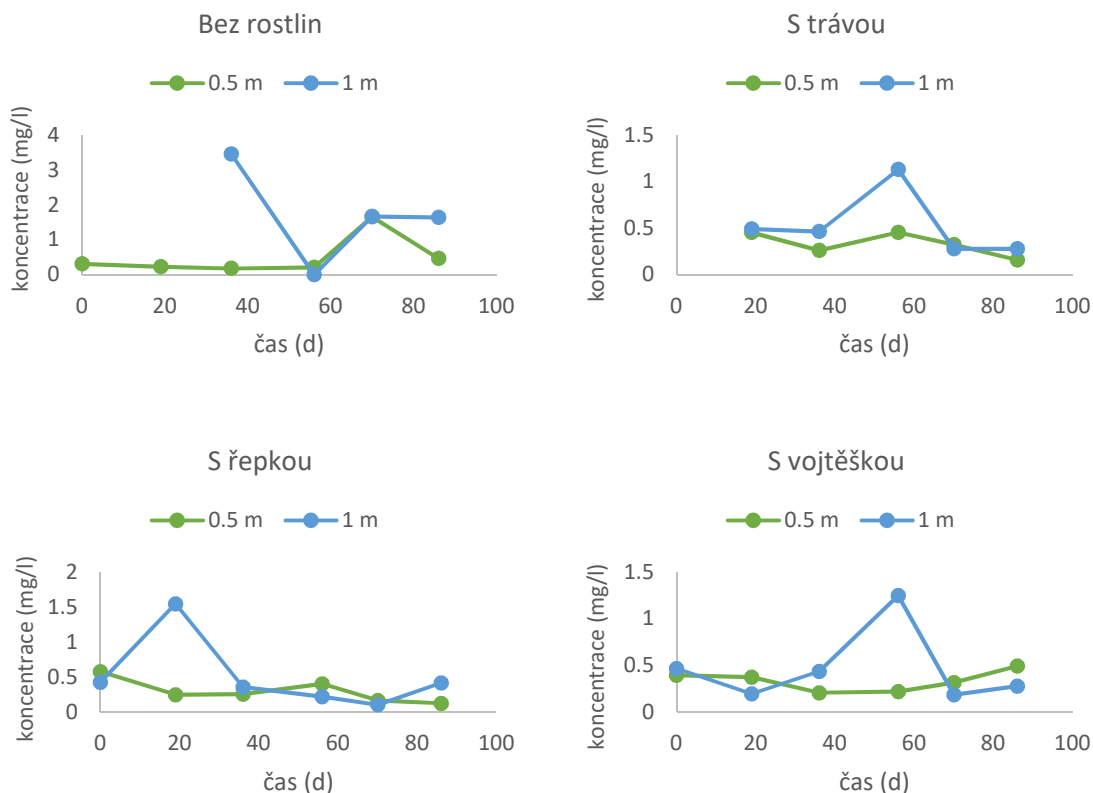
Fosforečnany mají zásadní vliv na eutrofizaci povrchových vod, jejich hygienický význam je ale malý. U podzemních vod mají fosforečnany indikační funkci a jejich přítomnost může ukazovat na přítomnost fekálního znečištění. [Pitter, 2009]

V odpadních vodách se stanovuje koncentrace celkového fosforu. [Horáková, 2003]

3.5.1 Vstupní hodnoty

Tabulka 8 Hodnoty P-PO₄⁻³ změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.

P-PO ₄ ⁻³									
		zkušební segment							
		bez rostlin		tráva		řepka		vojtěška	
čas	na přítoku	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m
<i>dny od počátku</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>
0	5.98		0.315			0.423	0.576	0.465	0.393
19	6.24	-	0.224	0.491	0.453	1.55	0.245	0.196	0.373
36	5.61	3.46	0.179	0.464	0.262	0.355	0.253	0.436	0.206
56	6.13	-	0.209	1.13	0.454	0.218	0.402	1.25	0.22
70	6.04	1.67	1.66	0.278	0.322	0.102	0.161	0.184	0.314
86	5.86	1.64	0.468	0.278	0.159	0.415	0.123	0.276	0.493

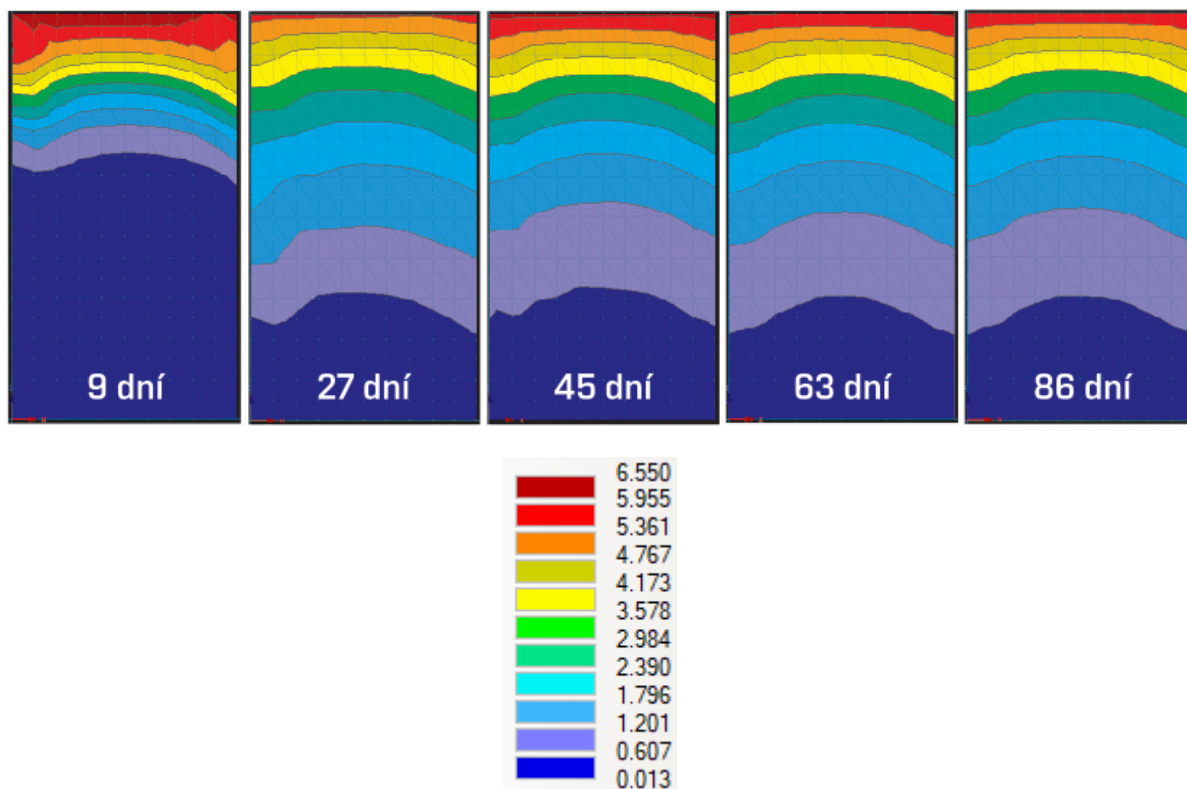


Graf 13 Grafické znázornění vývoje koncentrace $P-PO_4^{3-}$ v čase

Naměřené hodnoty jsou překvapivé, protože naproti očekávání, že v metrové hloubce bude znečištění menší než v hloubce půlmetrové, je z grafů dobře vidět opačná situace. Ve třech segmentech hodnoty v 1 metru skokově vzrostly kolem 56. den měření, což může být způsobeno například dalším, neznámým, zdrojem znečištění. Jiným důvodem by mohl být rozklad organické hmoty v první polovině měřeného období, ke kterému dojít mohlo, protože zkušební půda nebyla před experimentem proseta a očištěna. Zdá se, že ke konci měřeného období dochází v půdním profilu ke stabilizaci a hodnoty znečištění v obou pozorovacích bodech se k sobě velmi přibližují. K ověření, zda se jedná o pokračující trend by bylo nutné v experimentálním měření pokračovat delší dobu.

3.5.2 Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty

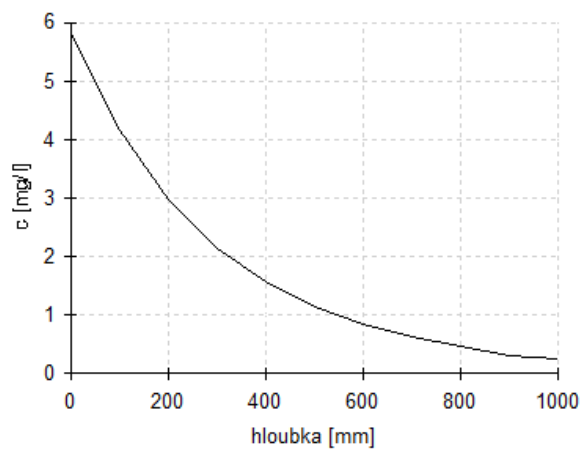
3.5.2.1 Segment bez vegetačního pokryvu



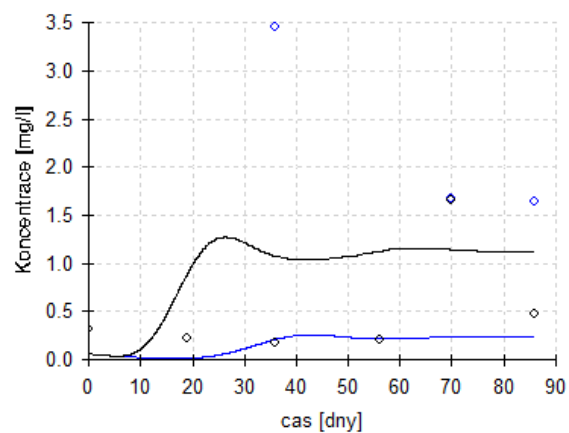
Obrázek 25 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace

Koncentrace $P-PO_4^{3-}$ s hloubkou klesá, v nejnižší položeném pozorovacím bodě dosahuje po ustálení hodnoty 0,24 mg/l. Pod koncentrací 1 mg/l klesá od hloubky 600 mm.

Koncentrace, cas 8 - 72.0 dní

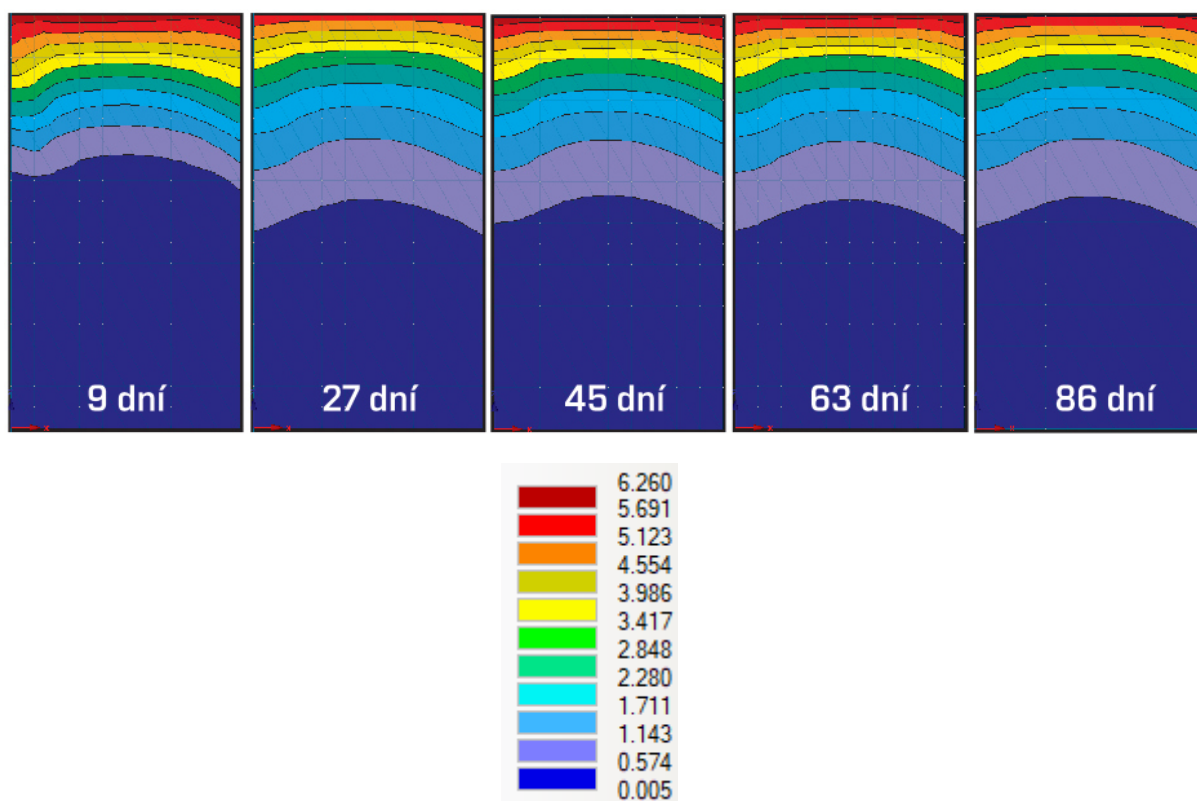


Pozorovací body: Koncentrace



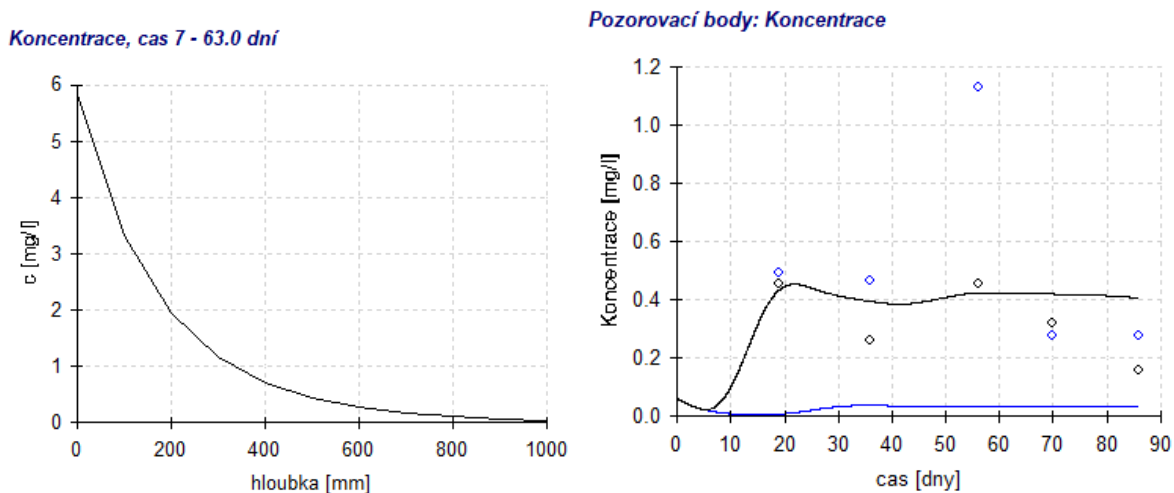
Graf 14 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění P-PO₄³⁻ v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

3.5.2.2 Segment s travním porostem



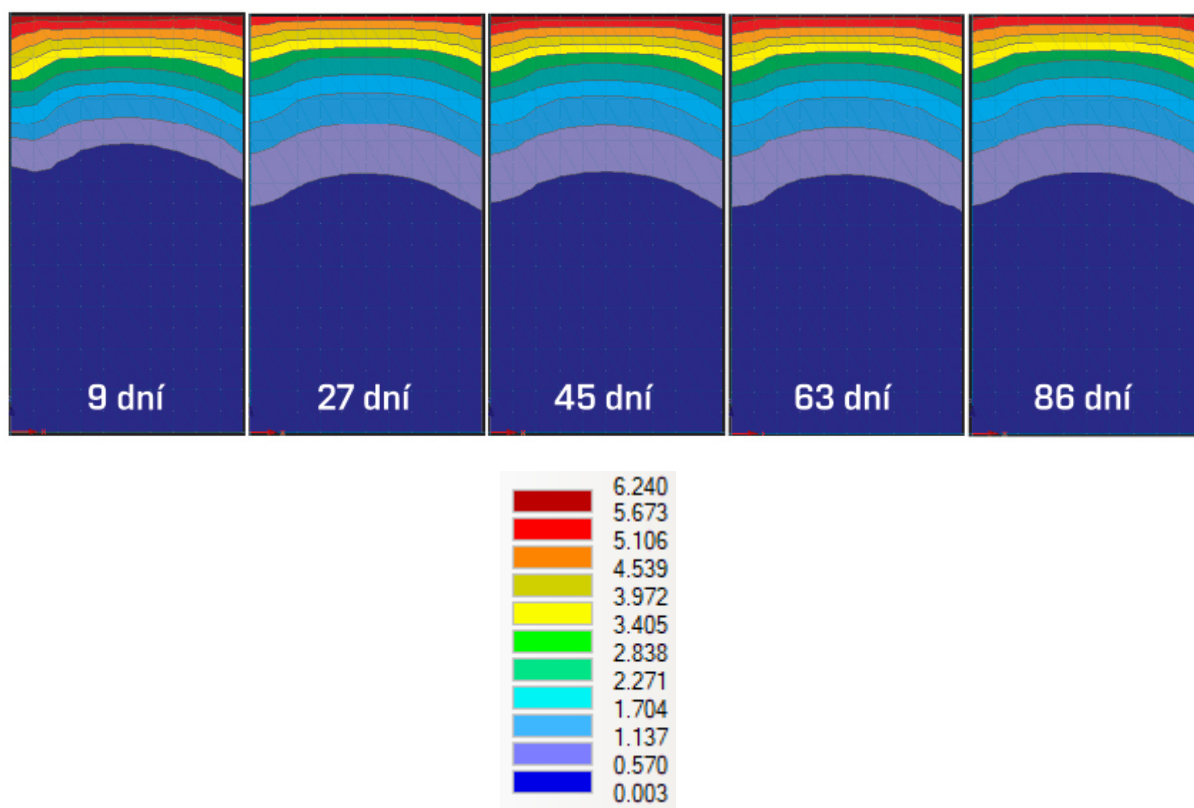
Obrázek 26 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem

Koncentrace P-PO_4^{3-} s hloubkou klesá, v nejnižší položeném pozorovacím bodě dosahuje po ustálení hodnoty 0,034 mg/l. Pod koncentrací 1 mg/l klesá od hloubky 380 mm, což je lepší výsledek, než v případě segmentu bez vegetačního pokryvu.



Graf 15 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění P-PO_4^{3-} v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

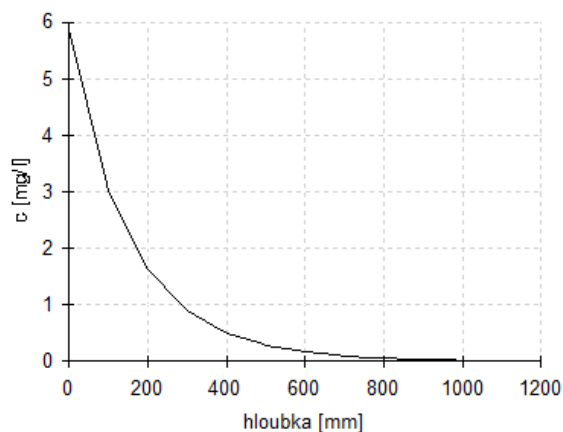
3.5.2.3 Segment s řepkou olejnou



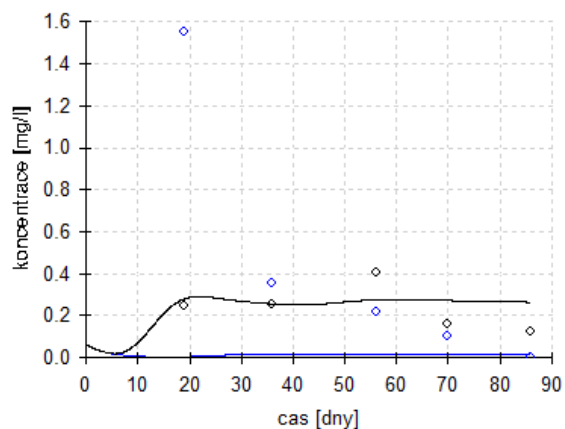
Obrázek 27 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou

Koncentrace P-PO_4^{-3} s hloubkou klesá, v nejnižší položeném pozorovacím bodě dosahuje po ustálení hodnoty 0,01 mg/l. Pod koncentrací 1 mg/l klesá od hloubky 220 mm a tento segment s řepkou olejnou tak vychází nejlépe v množství odbouraného P-PO_4^{-3} .

Koncentrace, cas 6 - 54.0 dni

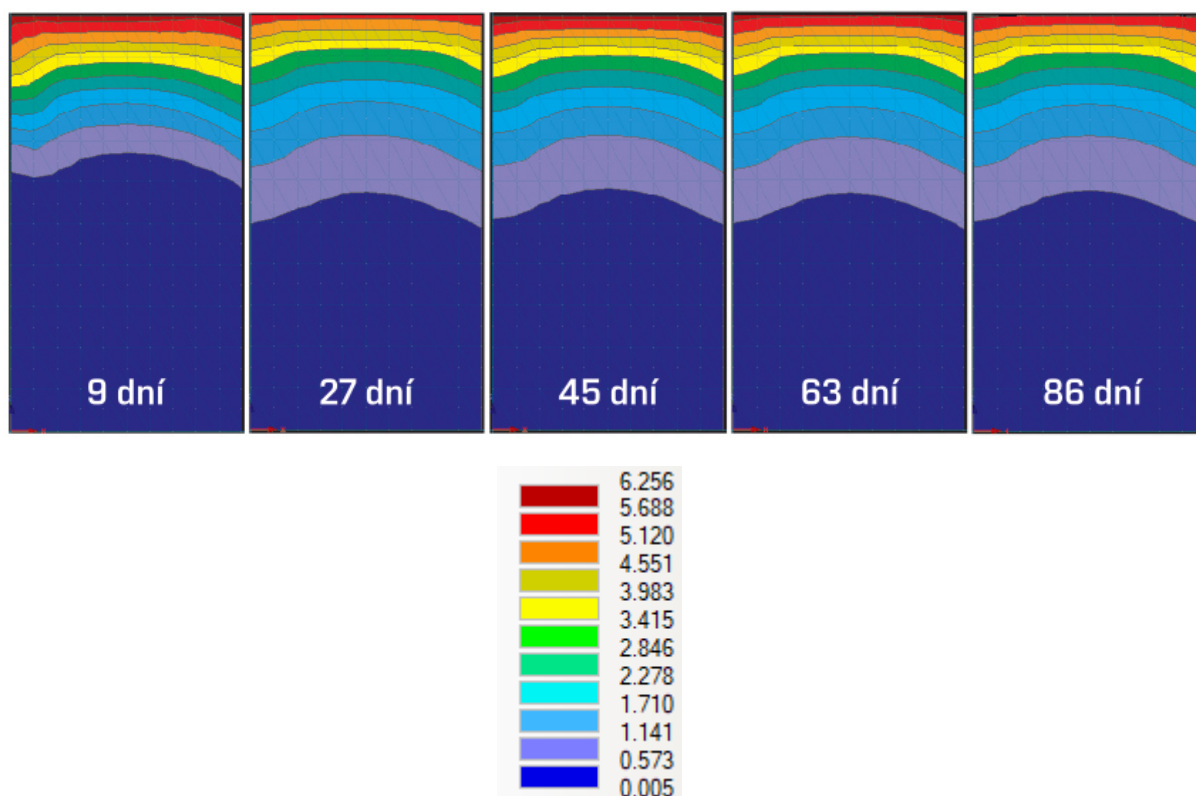


Pozorovací body: Koncentrace



Graf 16 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění P-PO₄⁻³ v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

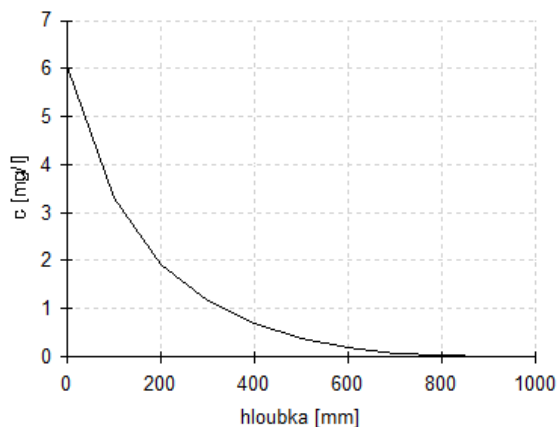
3.5.2.4 Segment s vojtěškou setou



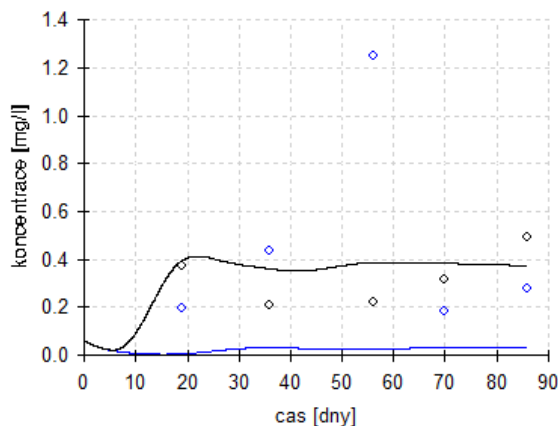
Obrázek 28 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou

Koncentrace P-PO_4^{-3} s hloubkou klesá, v nejnižší položeném pozorovacím bodě dosahuje po ustálení hodnoty 0,02 mg/l. Pod koncentrací 1 mg/l klesá od hloubky 250 mm a tento segment s vojtěškou setou tak vychází jako druhý nejlepší v množství odbouraného P-PO_4^{-3} .

Koncentrace, cas 2 - 18.0 dni



Pozorovací body: Koncentrace



Graf 17 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění P-PO_4^{-3} v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

3.5.3 Koeficienty z kalibračních modelů

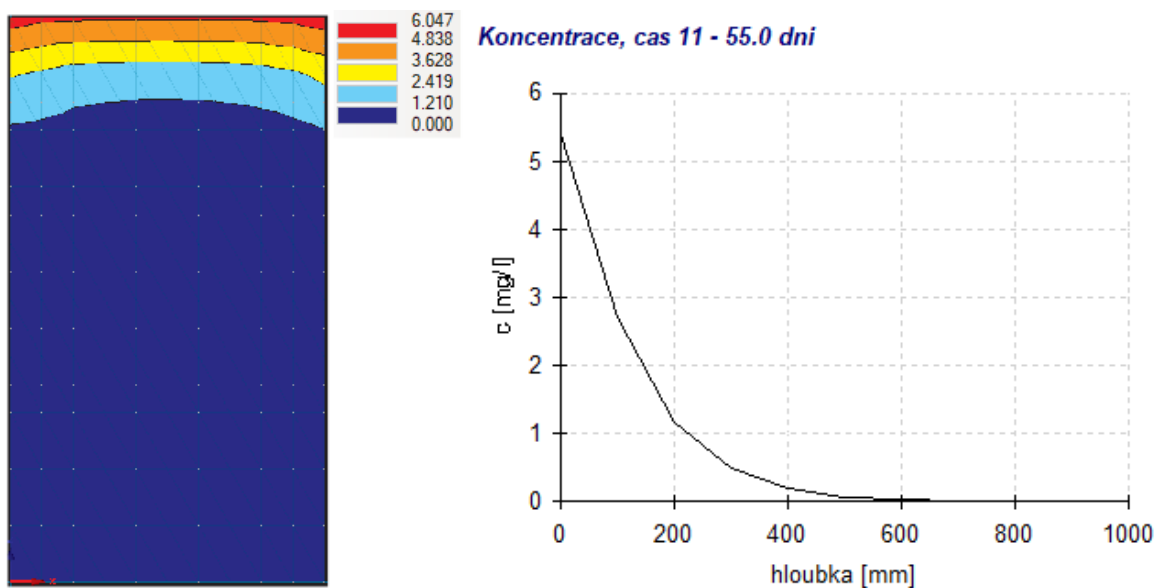
Tabulka 9 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění P-PO_4^{-3}

	zkušební segment			
	bez vegetace	s trávou	s řepkou	s vojtěškou
KD	5.53E-02	5.93E-04	1.70E-04	9.28E-04
SNKL1	1.27E-01	2.03E-01	2.36E-01	2.10E-01

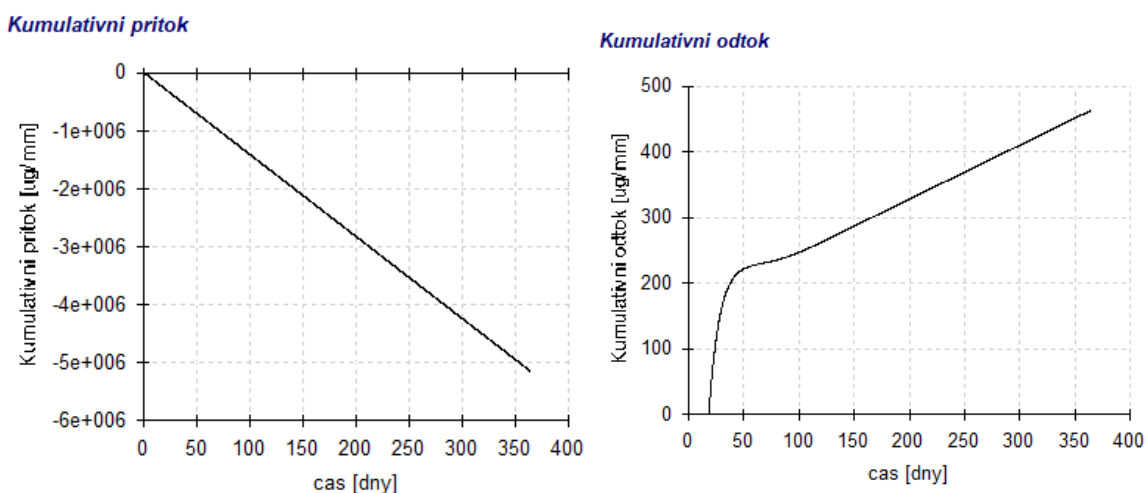
3.5.4 Zkalibrované modely znečištění P-PO_4^{-3}

Koncentrace na přítoku byla nastavena na 5,5 mg/l, což přibližně odpovídá průměrnému znečištění P-PO_4^{-3} na přítoku při experimentálním měření. Počáteční koncentrace znečištění byla ponechána na hodnotě 0,06 mg/l a počáteční vlhkost profilu byla nastavena 0,25. Závlahové dávky byly použity stejné, jako při modelování znečištění NH_4^+-N .

3.5.4.1 Segment bez vegetačního pokryvu



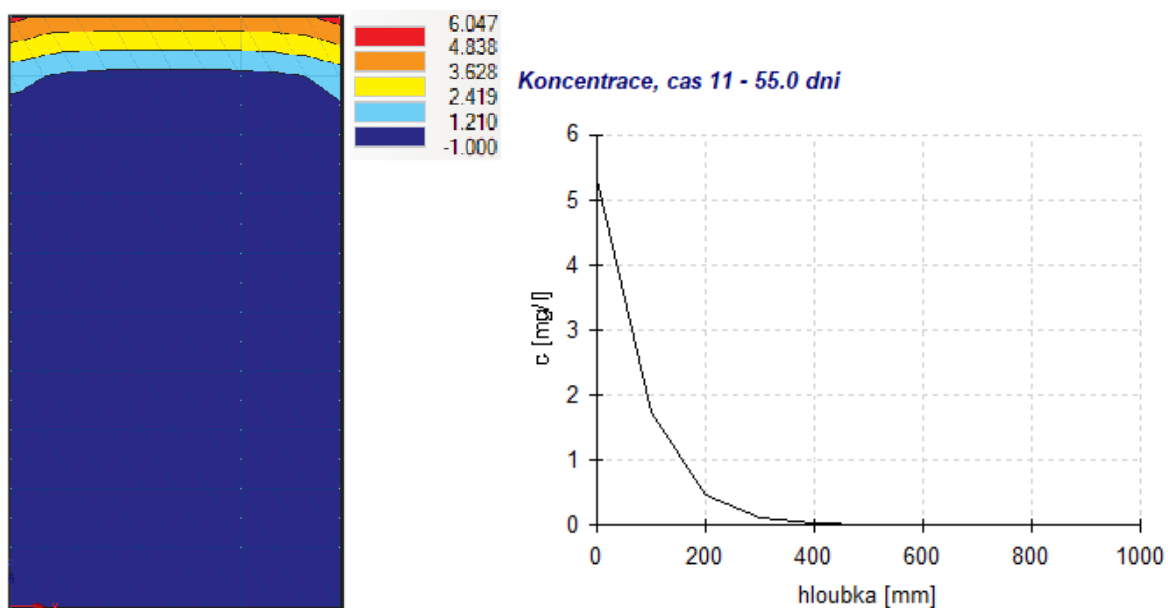
Obrázek 29 Průběh znečištění P-PO₄³⁻ po ustálení (55.den)



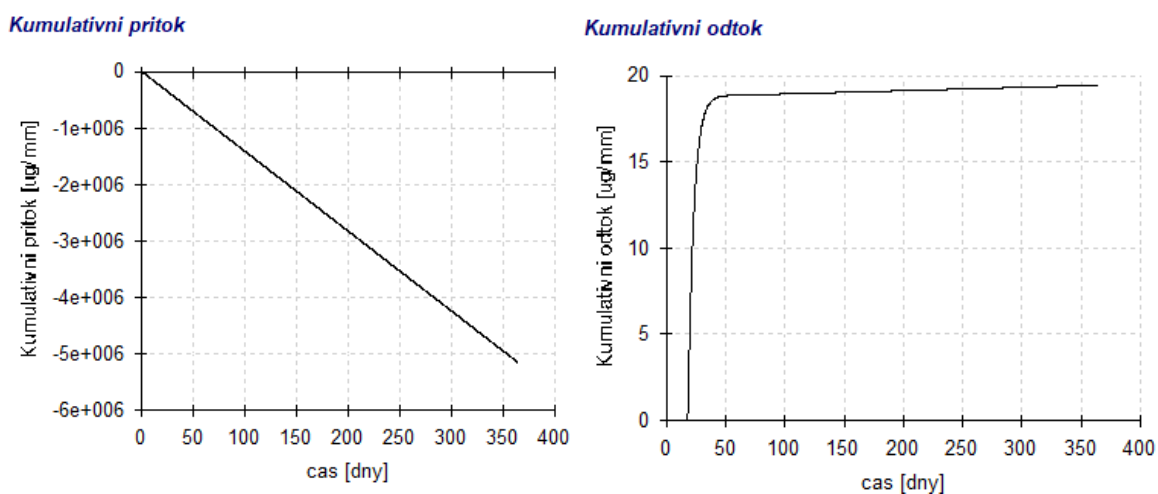
Graf 18 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) P-PO₄³⁻

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech 5,16 g/0,5m², tedy na ploše 1 m² se zachytí 10,3 g P-PO₄³⁻. Od hloubky 600 mm je již koncentrace nulová.

3.5.4.2 Segment s travním porostem



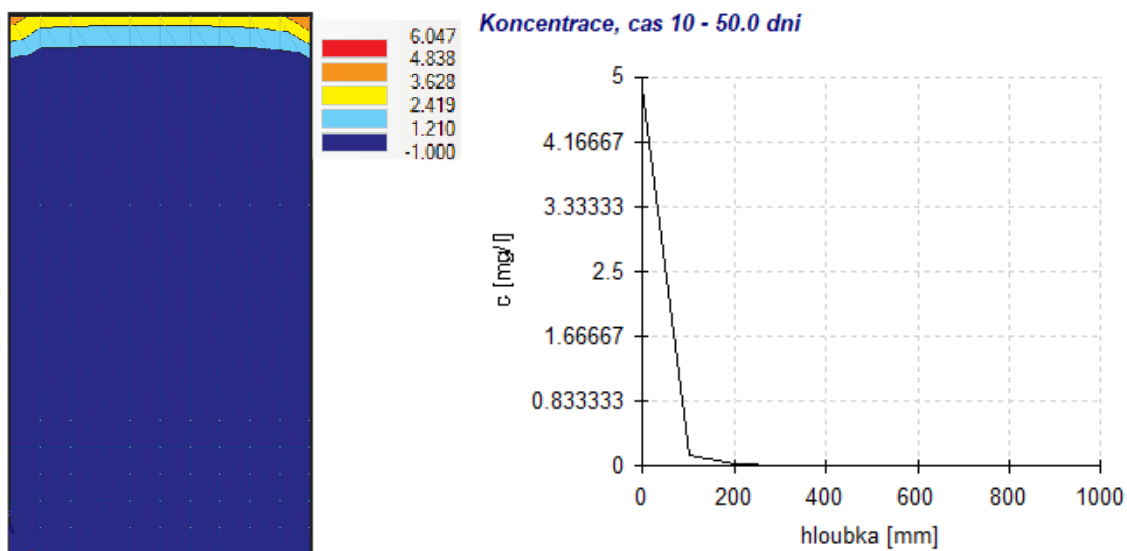
Obrázek 30 Průběh znečištění P-PO_4^{3-} po ustálení (55.den)



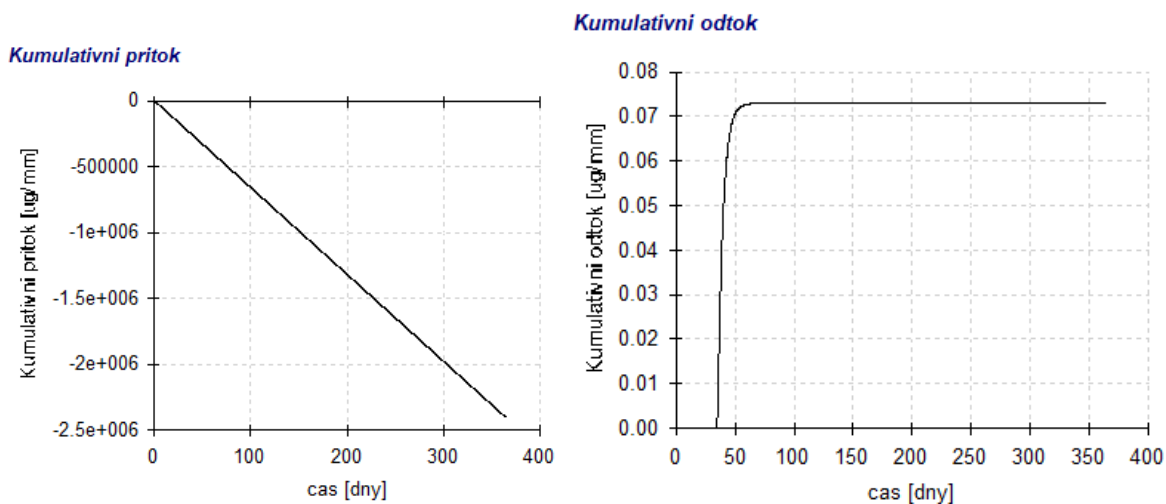
Graf 19 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) P-PO_4^{3-}

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech $10,3 \text{ g/m}^2$. Od hloubky 400 mm je již koncentrace P-PO_4^{3-} nulová.

3.5.4.3 Segment s řepkou olejnou



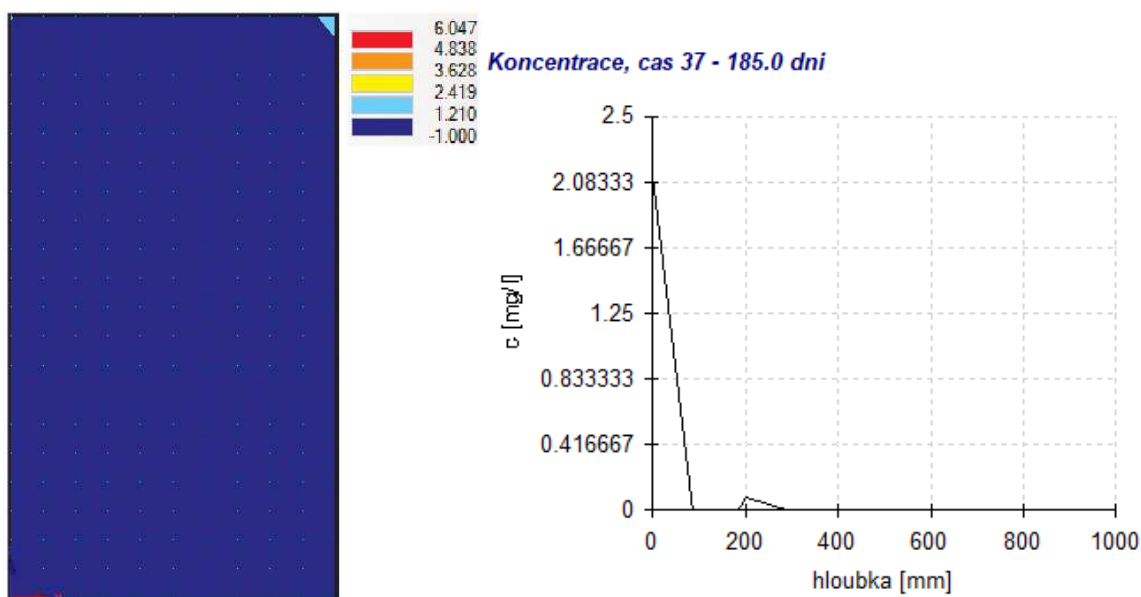
Obrázek 31 Průběh znečištění P-PO₄³⁻ po ustálení (50.den)



Graf 20 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) P-PO₄³⁻

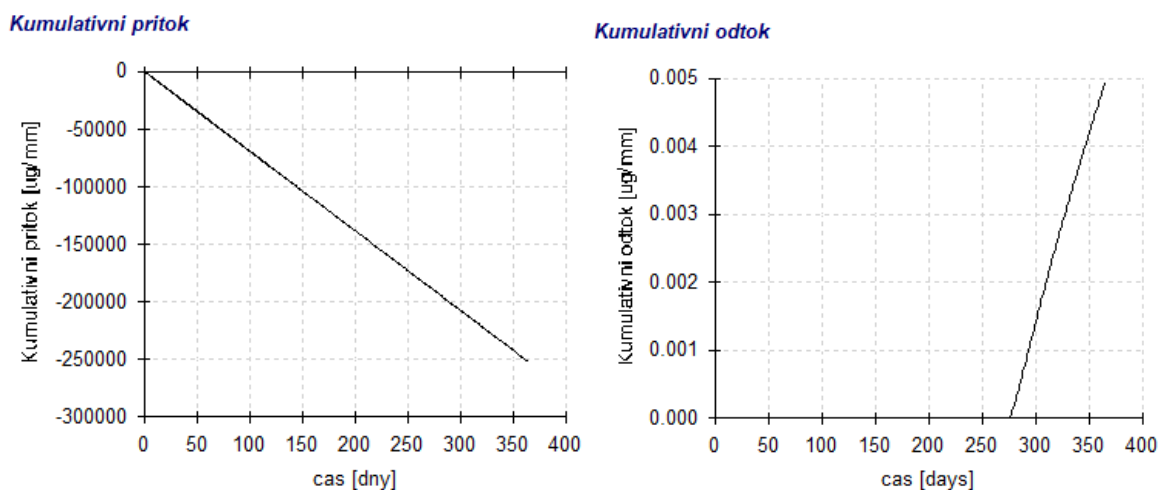
Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech 4,81 g/m². Od hloubky 200 mm je již koncentrace P-PO₄³⁻ nulová.

3.5.4.4 Segment s vojtěškou setou



Obrázek 32 Průběh znečištění P-PO₄³⁻ po ustálení (185.den)

Při závlahové dávce 0,21 mm/den je modelované znečištění natolik malé, že při zachování jednotné barevné škály je z grafického výstupu těžko rozpoznatelné. Z příčného řezu čteme maximální hodnotu znečištění těsně pod úrovní terénu 2,1 mg/l.



Graf 21 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) P-PO₄³⁻

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech 0,51 g/m².

3.6 ZNEČIŠTĚNÍ CHSK

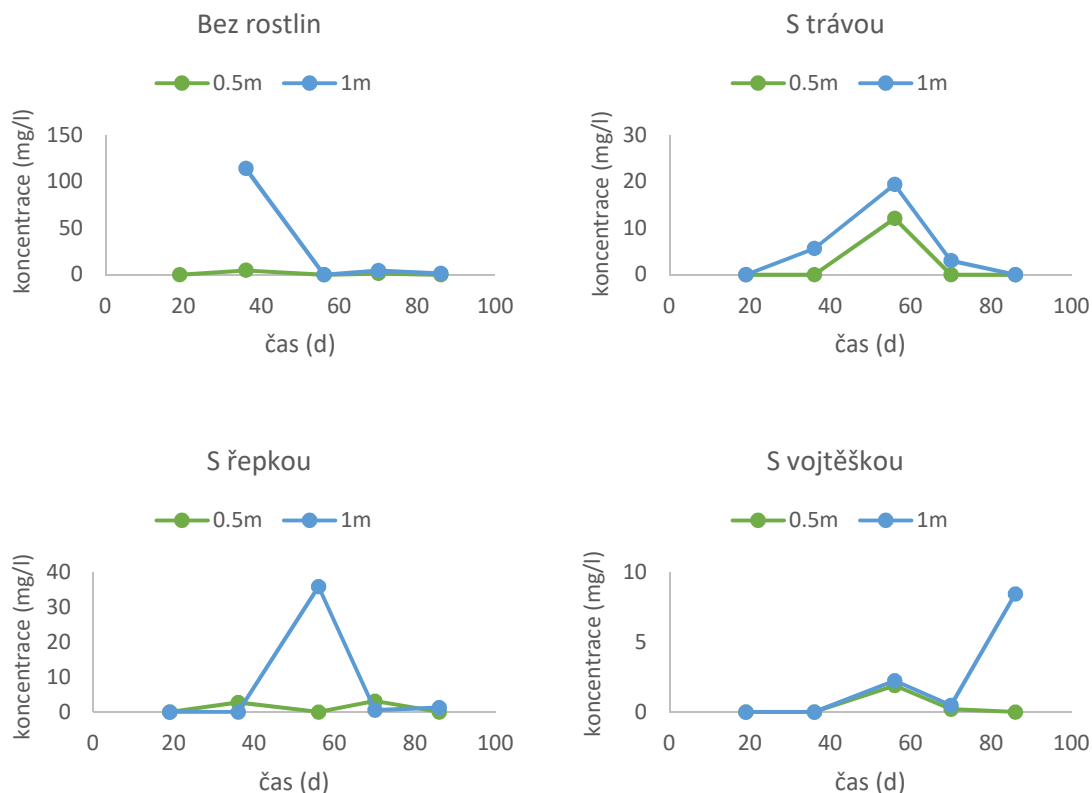
Chemická spotřeba kyslíku (označována značkou CHSK) je definována jako hmotnostní koncentrace kyslíku, která je ekvivalentní hmotnosti oxidačního činidla, které je spotřebováno na oxidaci oxidovatelných látek v 1 l vody. Velikost CHSK slouží k odhadu organického znečištění vody a patří mezi tzv. nespecifické ukazatele vody. Hodnota CHSK je základním ukazatelem kvality vody při rozboru pitné vody, kontrole jakosti povrchových vod a kontrole odpadních vod. [Horáková, 2003]

Oxidaci lze provádět manganistanem draselným (KMnO_4) nebo dichromanem draselným ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Při použití dichromanu zpravidla dostáváme vyšší hodnoty CHSK než při užití manganistanu proto, že jde o silnější oxidační činidlo. Proto se při rozbořech přírodních a pitných vod používá manganistan. [Malý, Malá, 2000]

3.6.1 Vstupní hodnoty

Tabulka 10 Hodnoty CHSK změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.

CHSK									
		zkušební segment							
		bez rostlin		tráva		řepka		vojtěška	
čas	na přítoku	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m	1 m	0.5 m
<i>dny od počátku</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>
0	124								
19	203		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
36	87.5	114	4.64	5.64	0.001	0.001	2.68	0.001	0.001
56	68.8	0	0	19.4	12.1	35.9	0.001	2.23	1.89
70	53.2	4.6	1.4	3	0.01	0.5	3.1	0.46	0.19
86	86	1.18	0.001	0.001	0.001	1.2	0.001	8.46	0.001

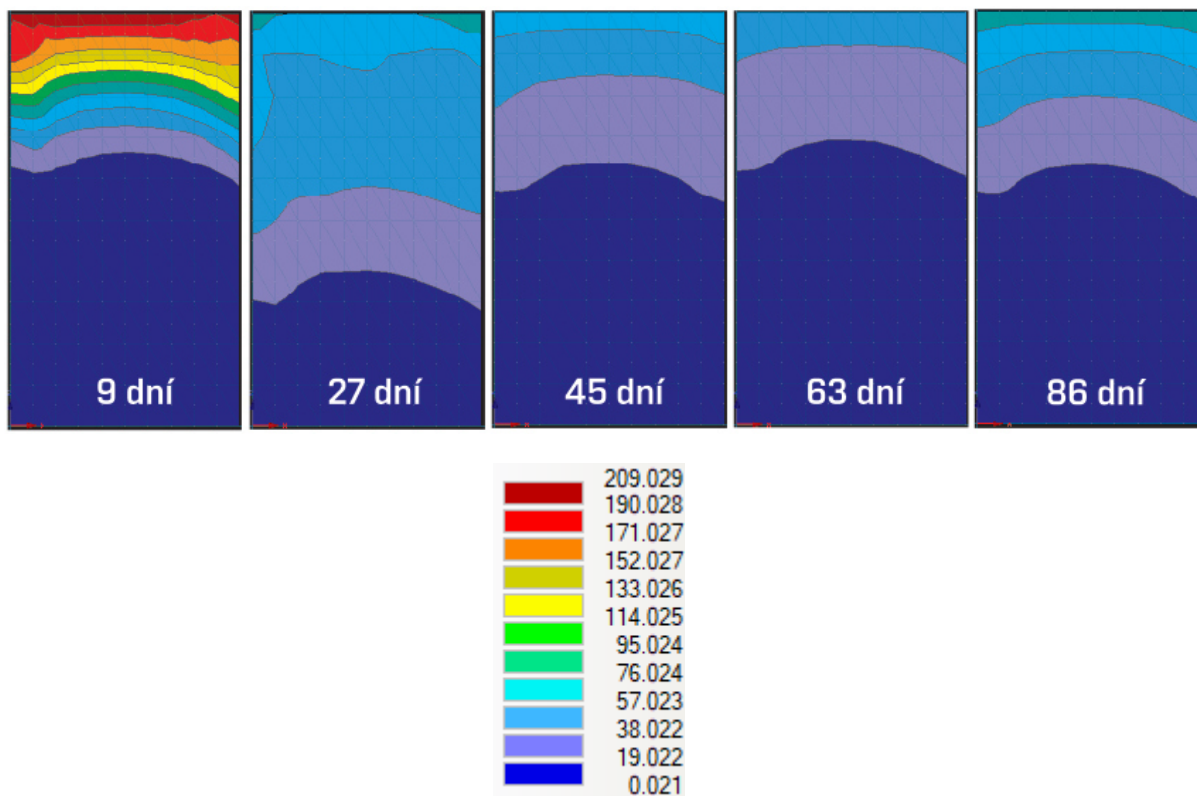


Graf 22 Grafické znázornění vývoje koncentrace CHSK v čase

Stejně jako v případě měření znečištění P-PO_4^{3-} , i u hodnot CHSK je z grafů patrné, že koncentrace v pozorovacím bodě 1 m hloubky je zpravidla vyšší než v pozorovacím bodě v 0,5 m hloubky. V každém segmentu došlo v průběhu měřeného období k jednomu silnému výkyvu v koncentraci CHSK v 1 m. Nelze však říci, že se jedná o stejný měřený úsek. V prvním segmentu je tento výkyv v 36.dni, v druhém a třetím segmentu v 56.dni a ve čtvrtém segmentu na konci měření v 86.dni. Není tedy možné říci, v jaké souvislosti k těmto výkyvům došlo. V hloubce 0,5 m jsou hodnoty až na dvě výjimky velmi malé.

3.6.2 Kalibrační modely pro jednotlivé zkušební segmenty

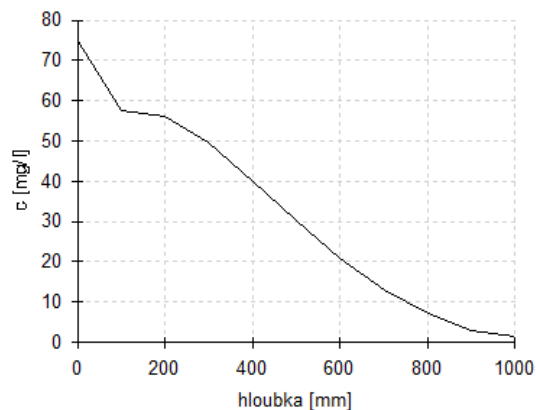
3.6.2.1 Segment bez vegetačního pokryvu



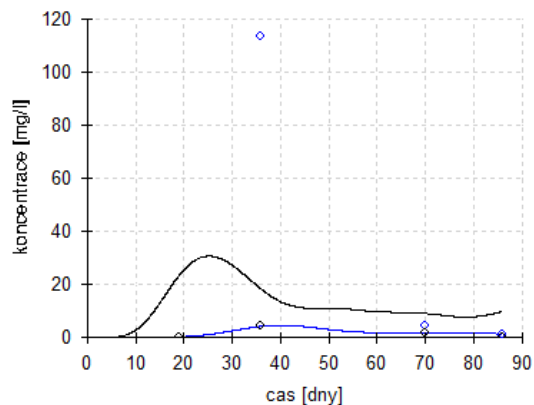
Obrázek 33 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace

V prvních dnech měření je koncentrace znečištění největší. To je bez pochyby dáno tím, že v těchto obdobích byla koncentrace CHSK na přítoku výrazně větší než následující dny. 27.den se hodnota v 1 m hloubky blíží 3 mg/l. To je například v porovnání s emisními standardy (75 mg/l jako nejpřísnější průměrná hodnota) zanedbatelné znečištění.

Koncentrace, cas 3 - 27.0 dni

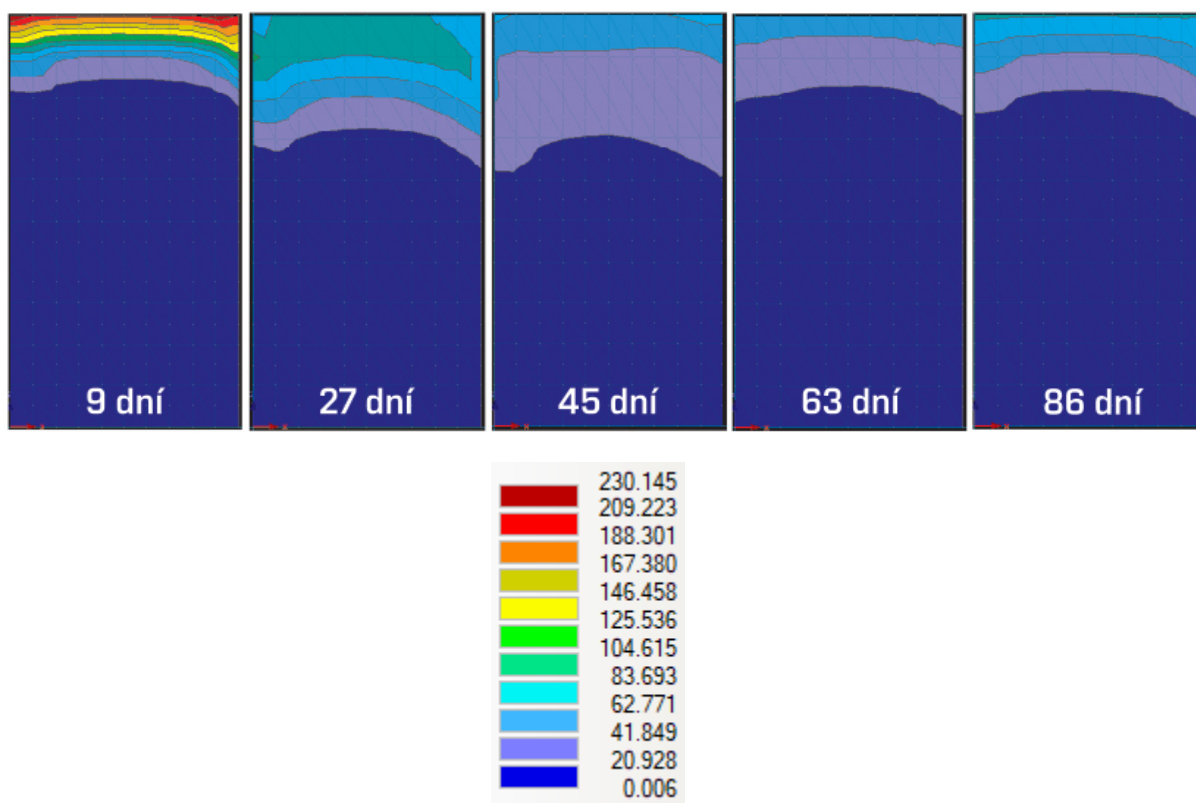


Pozorovací body: Koncentrace



Graf 23 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění CHSK v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

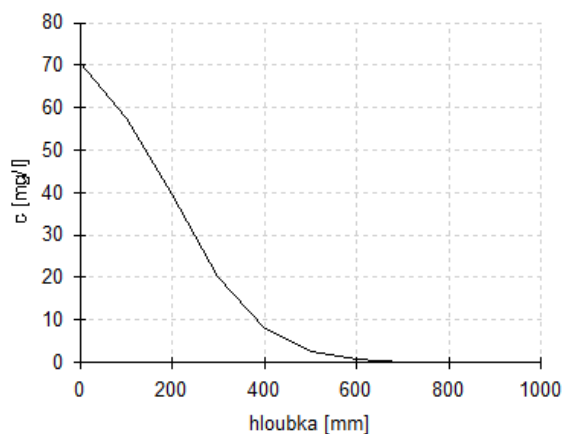
3.6.2.2 Segment s travním porostem



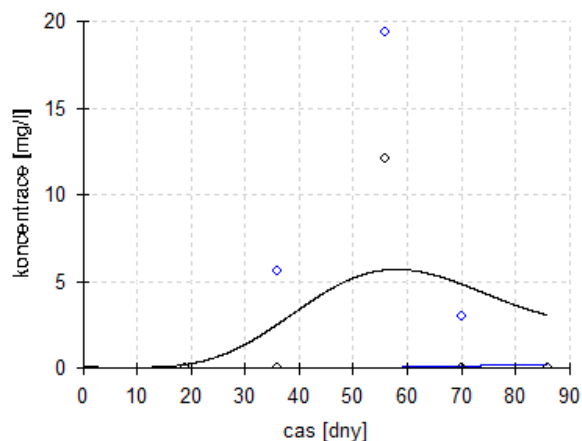
Obrázek 34 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem

Segment s travním porostem vychází v porovnání se segmentem bez vegetace lépe. Znečištění již v prvních dnech nedosahuje takové hloubky, a i v následujících dnech se od hloubky 600 mm blíží nulové hodnotě.

Koncentrace, cas 4 - 36.0 dni

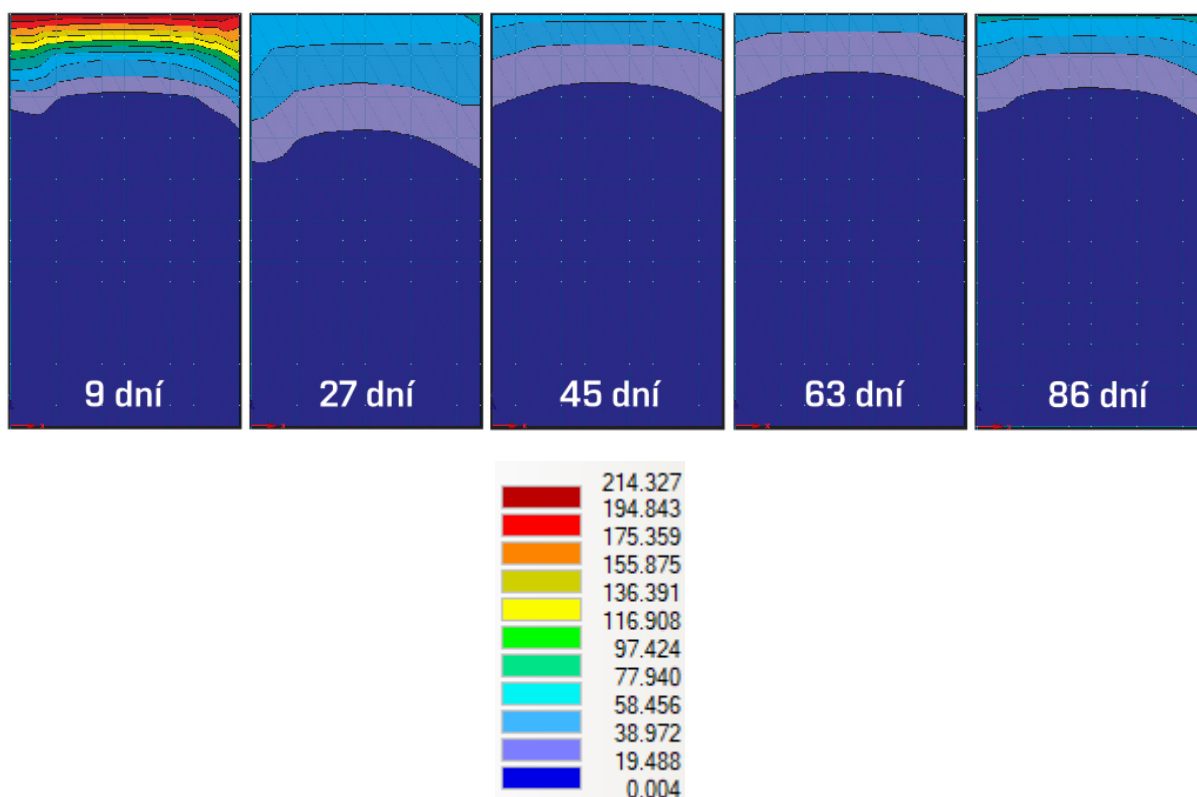


Pozorovací body: Koncentrace



Graf 24 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění CHSK v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivky pro dva pozorovací body (vpravo)

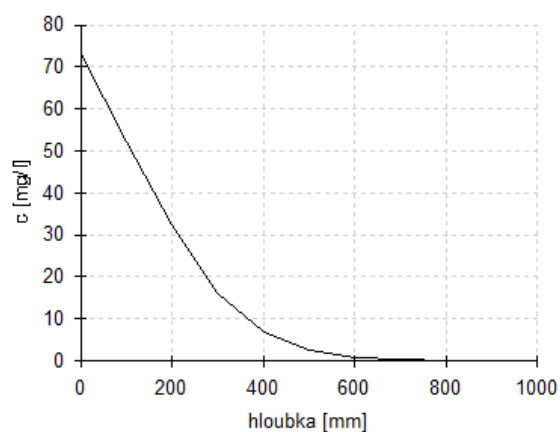
3.6.2.3 Segment s řepkou olejnou



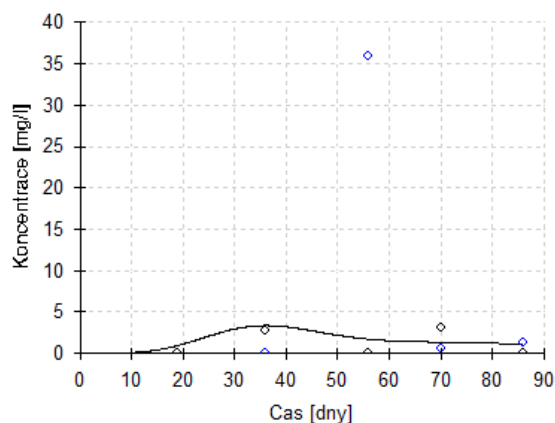
Obrázek 35 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou

Tento segment vychází velmi podobně jako segment s travním porostem. Od hloubky 600 mm je koncentrace CHSK téměř nulová.

Koncentrace, čas 3 - 27,0 dni

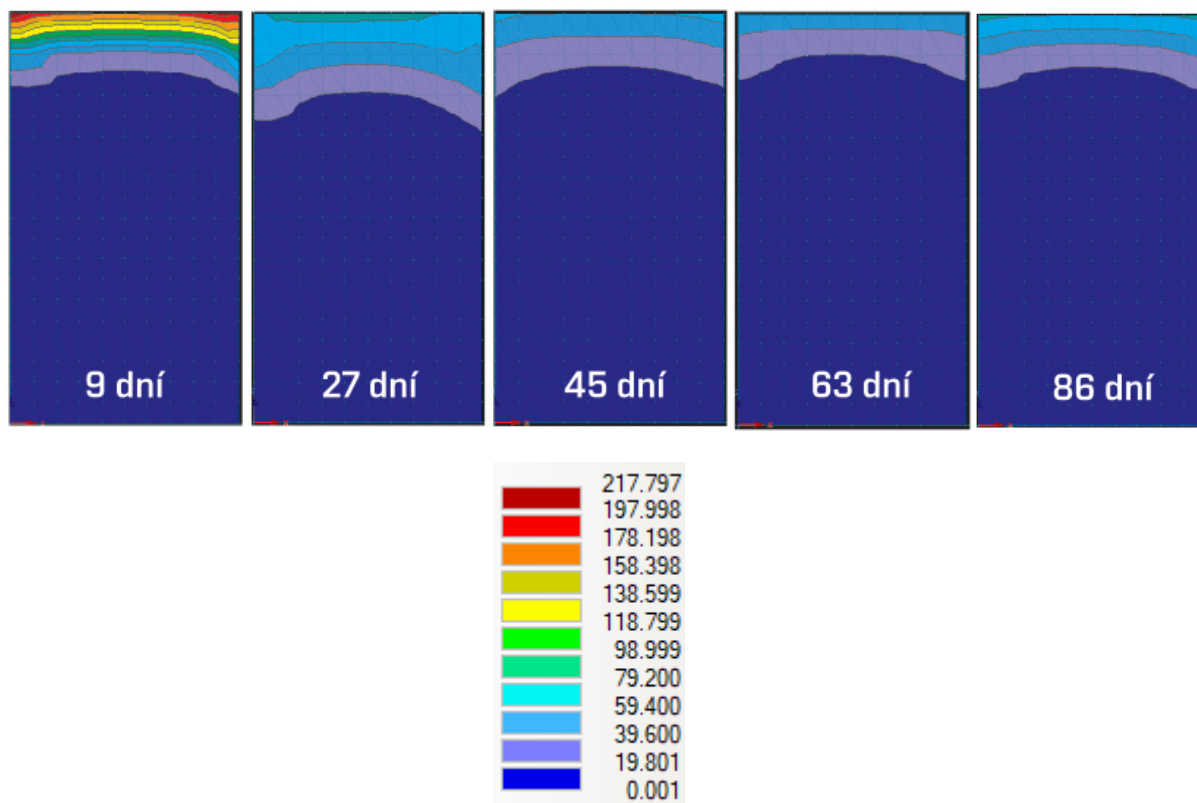


Pozorovací body: Koncentrace



Graf 25 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění CHSK v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivka pro pozorovací bod 0,5 m (vpravo)

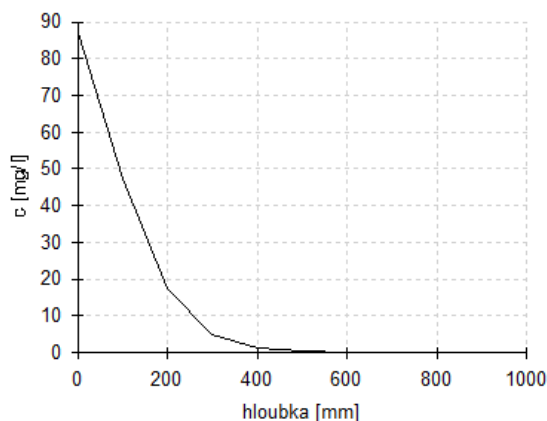
3.6.2.4 Segment s vojtěškou setou



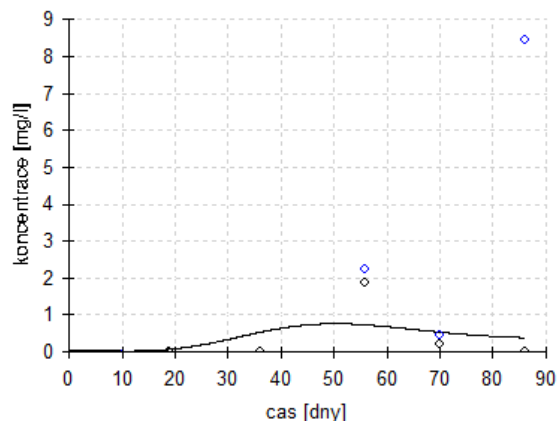
Obrázek 36 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou

Tento segment vychází o něco lépe než segmenty s travním porostem a s řepkou olejnou. Od hloubky 400 mm je koncentrace CHSK téměř nulová.

Koncentrace, čas 3 - 27.0 dni



Pozorovací body: Koncentrace



Graf 26 Výstup z HYDRUS: Koncentrace znečištění CHSK v závislosti na hloubce (vlevo) a kalibrační křivka pro pozorovací bod 0,5 m (vpravo)

3.6.3 Koeficienty z kalibračních modelů

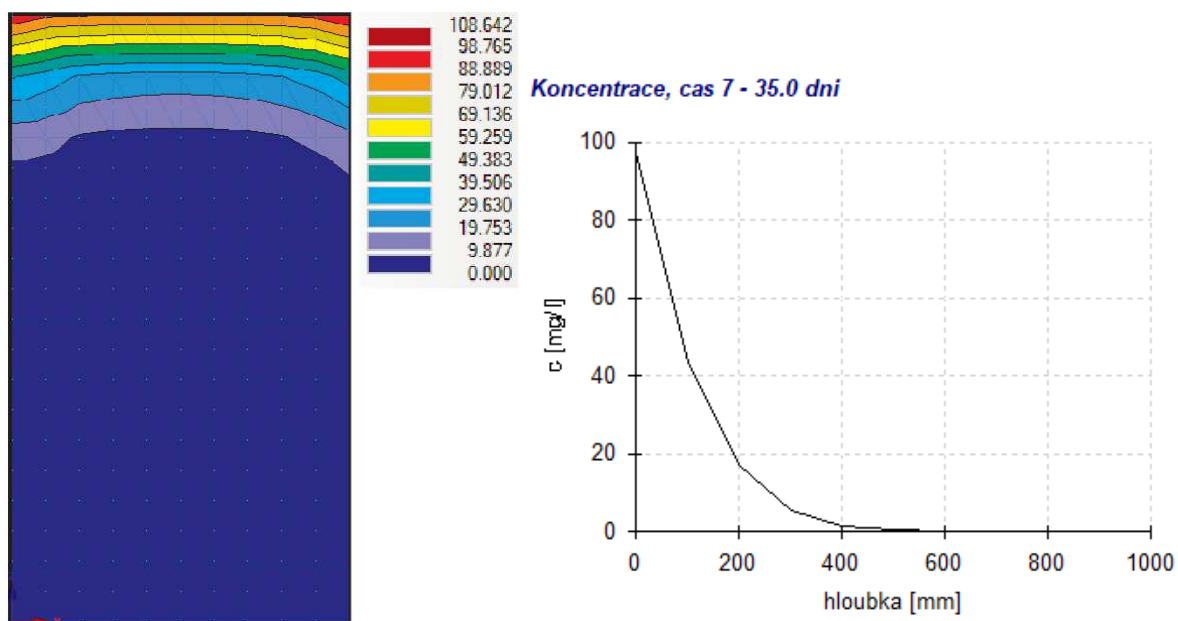
Tabulka 11 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění CHSK

	zkušební segment			
	bez vegetace	s trávou	s řepkou	s vojtěškou
KD	4.58E-02	6.26E-01	2.67E-01	5.77E-01
SNKL1	1.49E-01	2.41E-01	2.99E-01	3.90E-01

3.6.4 Zkalibrované modely znečištění CHSK

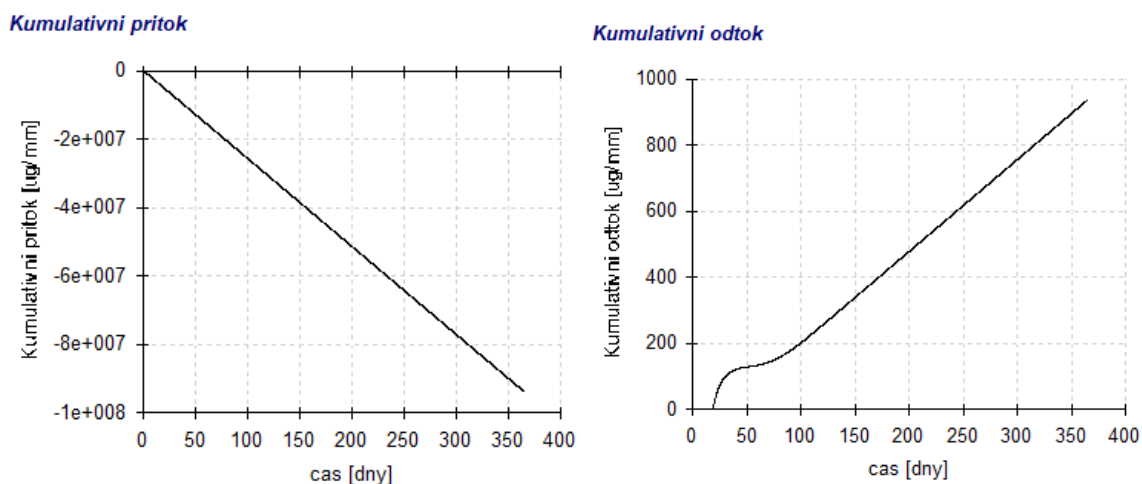
Koncentrace na přítoku byla nastavena na 100 mg/l, což přibližně odpovídá průměrnému znečištění CHSK na přítoku při experimentálním měření. Počáteční koncentrace znečištění byla ponechána na hodnotě 0,06 mg/l a počáteční vlhkost profilu byla nastavena na 0,25. Závlahové dávky byly použity stejné, jako při modelování znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ a P-PO_4^{3-} .

3.6.4.1 Segment bez vegetačního pokryvu



Obrázek 37 Průběh znečištění CHSK po ustálení (35.den)

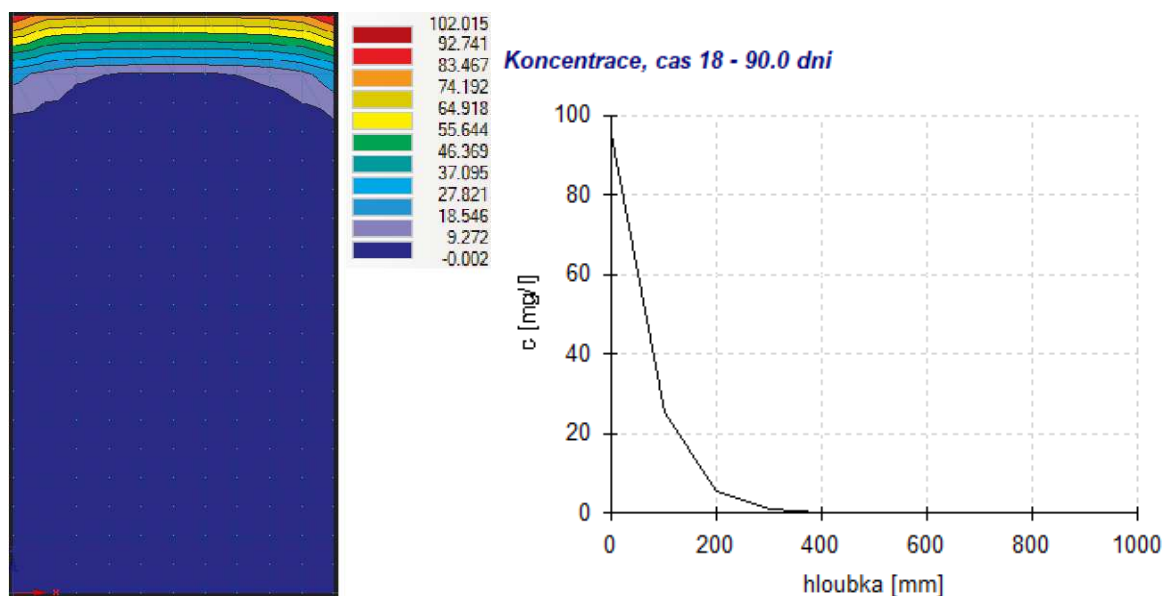
Závlahová dávka je 4,29 mm/den.



Graf 27 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) CHSK

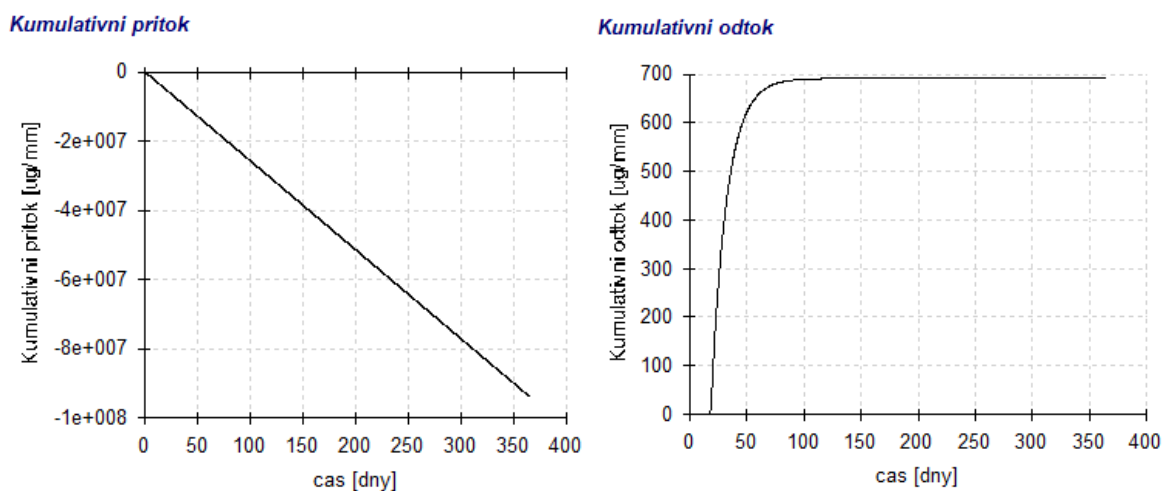
Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech 187,9 g/m². Od hloubky 400 mm se již koncentrace CHSK blíží nulové hodnotě.

3.6.4.2 Segment s travním porostem



Obrázek 38 Průběh znečištění CHSK po ustálení (90.den)

Závlahová dávka je 4,29 mm/den.

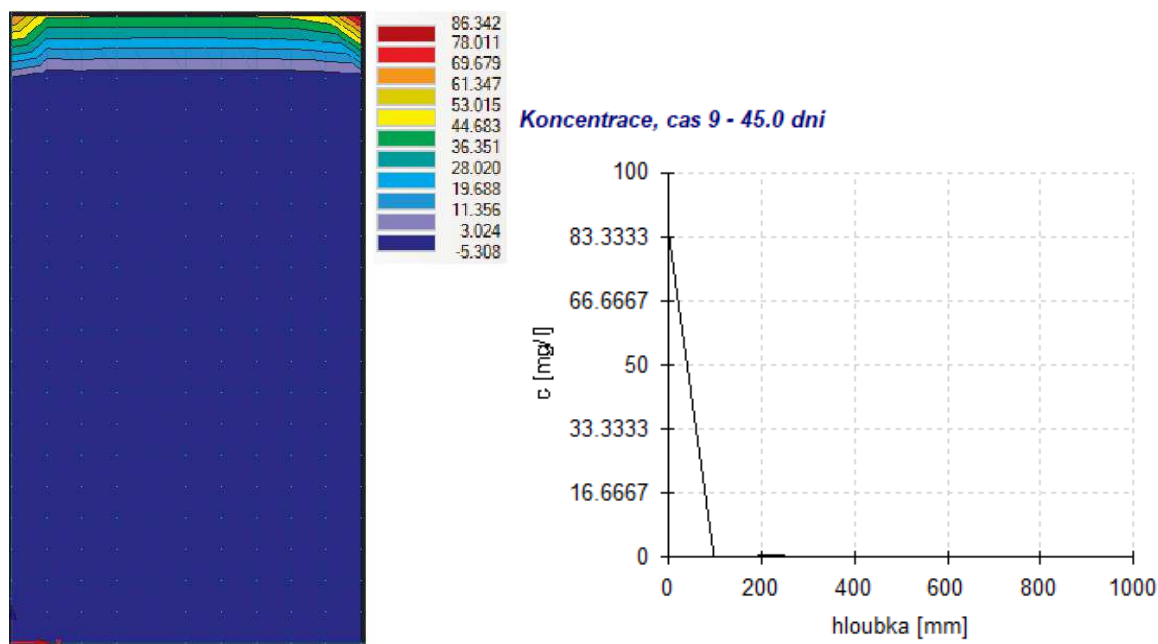


Graf 28 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) CHSK

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech 187,7 g/m². To je téměř totožná hodnota jako v případě předchozího segmentu, a je dána shodnou závlahovou dávkou a podobnými parametry modelu.

Od hloubky 400 mm je koncentrace CHSK nulová.

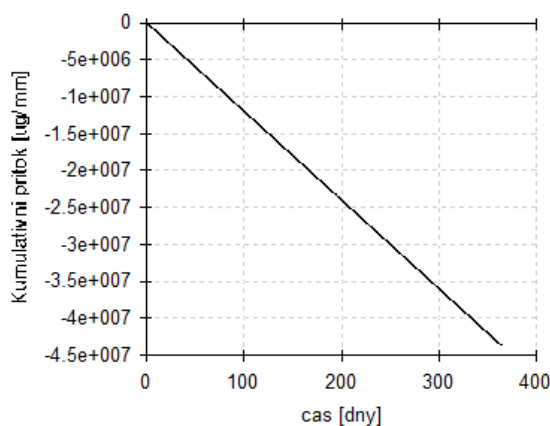
3.6.4.3 Segment s řepkou olejnou



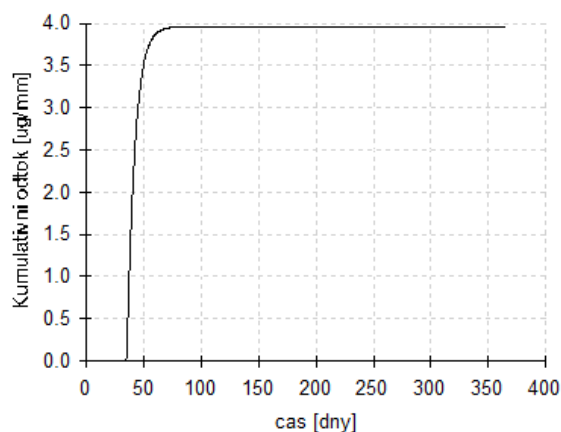
Obrázek 39 Průběh znečištění CHSK po ustálení (45.den)

Závlahová dávka je 2 mm/den.

Kumulativní přítok



Kumulativní odtok

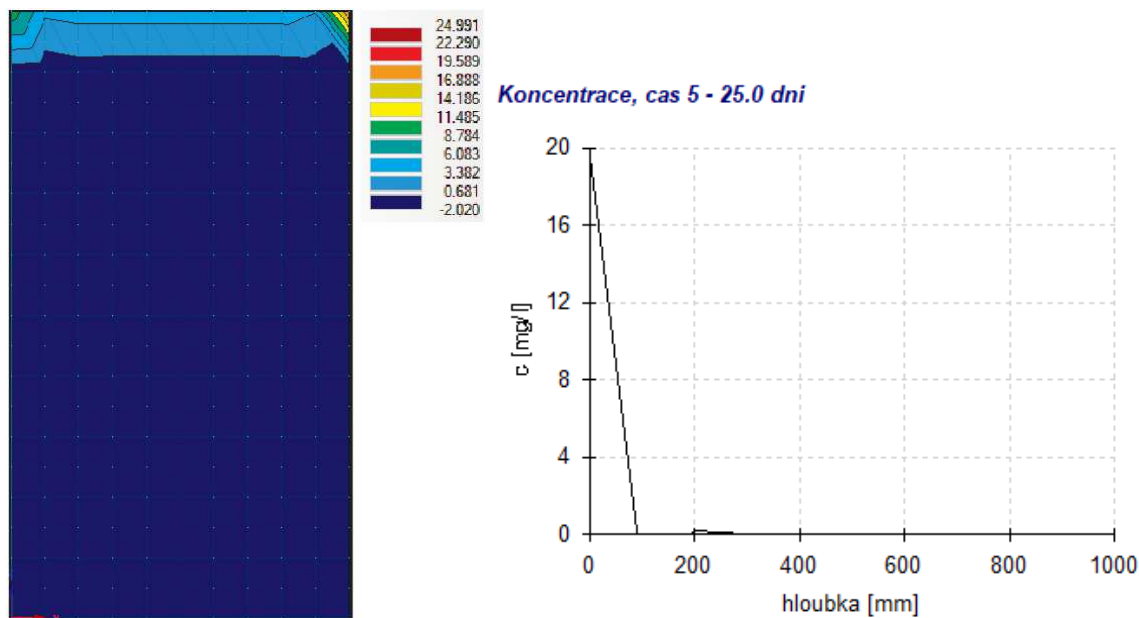


Graf 29 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) CHSK

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech $87,6 \text{ g/m}^2$. Zhruba poloviční hodnota zachyceného CHSK oproti předchozím dvěma segmentům odpovídá zhruba poloviční závlahové dávce.

Od hloubky 150 mm je již koncentrace CHSK nulová.

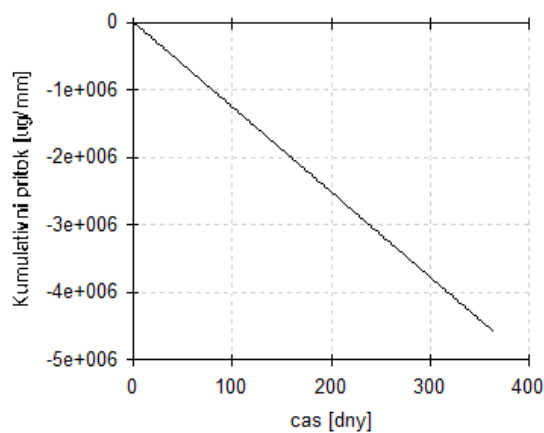
3.6.4.4 Segment s vojtěškou setou



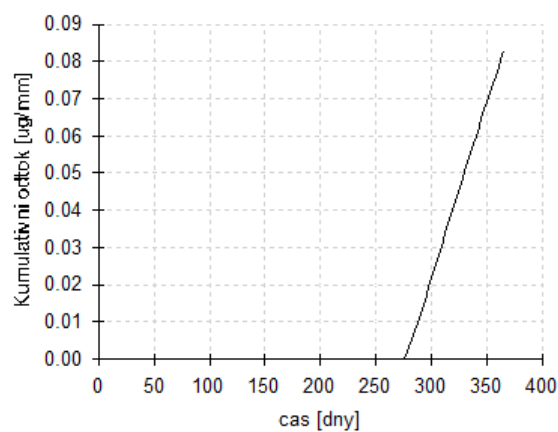
Obrázek 40 Průběh znečištění CHSK po ustálení (25.den)

Závlahová dávka je 0,21 mm/den.

Kumulativní přítok



Kumulativní odtok



Graf 30 Kumulativní přítok (vlevo) a kumulativní odtok (vpravo) CHSK

Rozdíl mezi kumulativním znečištěním na přítoku a odtoku činí po 365 dnech $9,2 \text{ g/m}^2$.

Od hloubky 150 mm je již koncentrace CHSK nulová.

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

4.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Jak bylo uvedeno výše, amoniakální dusík je jedním z parametrů, který se sleduje při vypouštění odpadních vod do povrchových i podzemních vod. Proto lze předpokládat jeho výskyt i ve vyčištěné odpadní vodě. Při závlaze částečně vyčištěnou vodou za podmínek, které jsou popsány v kapitole 3.1, je rozsah znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ větší a zasahuje do větší hloubky u segmentů bez vegetace a s travním porostem. I vzhledem ke stejné zvolené závlahové dávce tyto dva segmenty vychází velmi podobně. Segmenty s řepkou olejnou a vojtěškou setou vychází v porovnání s předchozími lépe – rozsah znečištění je menší a dosahuje velmi malých hodnot již v hloubce 5 cm pod povrchem. Lze tedy předpokládat, že volba druhu vegetace může hrát v hodnocení predikce znečištění podzemní vody jistou úlohu. Jak je tato úloha velká, lze určit na základě získaných výsledků – na druhou stranu bylo při pozorování zjištěno, že účinnost svrchní vrstvy ovlivní i kondice (vitalita), stáří, hustota, nadzemní i podzemní biomasa přítomné vegetace. Získaná data odpovídají kritické situaci, kdy nedochází k ředění závlahové vody prostřednictvím srážkových úhrnů, současně není dostatečně účinná čistírna odpadních vod a množství odpadní vody je několikanásobně vyšší než to, které vyhovuje rostlinám. Takto byl pokus záměrně designován, jinak by nebylo možné provádět natolik účinné pozorování a kalibraci modelu. V praxi, zejména v zemědělství uplatňujícím technické plodiny, bude hydraulické zatížení s největší pravděpodobností nižší, než 13 mm/den.

Na první pohled je však patrné, že obavy o znečištění podzemní vody při závlaze splaškovou vodou amoniakálním dusíkem nejsou na místě. I při volbě nejhoršího scénáře, při kterém je 100% vláhové potřeby rostlin dodáváno doplňkovou závlahou splaškové vody není možné hovořit o kontaminaci podzemní vody, která se nachází v řádově větších hloubkách.

V případném dalším experimentu by bylo zajímavé umístit více pozorovacích bodů do hloubky 0 – 0,5 m. Koncentrace $\text{NH}_4^+\text{-N}$ v hloubce 1 m jsou velmi malé a je zřejmé, že toto znečištění nebude působit potíže. Zahuštění měření v první polovině profilu by nám poskytlo lepší obrázek o průběhu odbourávání $\text{NH}_4^+\text{-N}$ a modely vytvořené na základě těchto hodnot by byly jistě přesnější.

4.2 P-PO₄⁻³

Modelované odbourávání P-PO₄⁻³ v půdním profilu je zatíženo atypickým rozdělením hodnot při experimentálním měření, při kterém byly stanoveny hodnoty v hloubce 1 metr vyšší než v hloubce 0,5 m. Ve třech segmentech ze čtyř pozorujeme skokový nárůst koncentrace v pozorovacím bodě v hloubce jeden metr. To mohlo být způsobeno například dalším, neznámým, zdrojem znečištění vniklým do systému nebo rozkladem organické hmoty v první polovině měřeného období. Na základě získaných dat se ukazuje, že ke konci měřeného období dochází v půdním profilu ke stabilizaci a hodnoty znečištění v obou pozorovacích bodech se k sobě velmi přibližují. Avšak k ověření, zda se jedná o pokračující trend by bylo nutné v experimentálním měření pokračovat delší dobu, případně by bylo vhodné, na již realizovaném poloprovozním zařízení pokračovat v měření během další vegetační sezóny.

Na základě těchto naměřených hodnot tak byly kalibrovány modely, ve kterých se znečištění P-PO₄⁻³ snáze šíří do větších hloubek. Například v případě segmentu bez vegetace zůstává zbytkové znečištění i v hloubce 1 metr. Fosfor je spotřebováván kořenovým systémem rostlin při vegetačním růstu. Pokud bychom měli k dispozici další měřené hodnoty a předpokládali, že se koncentrace P-PO₄⁻³ v hloubce 1 m po čase ustálí, pravděpodobně bychom získali modely s ještě optimističtějšími výstupy. I přesto jsme získali velmi dobré výsledky a můžeme říci, že ani obavy o znečištění podzemní vody P-PO₄⁻³ nejsou oprávněné. Ani v jednom z modelovaných segmentů nepřekročila koncentrace v hloubce 200 mm pod terénem hodnotu 1 mg/l.

4.3 CHSK

Při interpretaci výsledků modelování znečištění CHSK je třeba brát v úvahu, že v době prvních dvou odečtů byla koncentrace CHSK na přítoku téměř dvojnásobně vyšší oproti dalším měřením. To muselo mít zákonitě vliv na naměřené hodnoty v pozorovacích bodech v hloubce 0,5 m a 1,0 m. Z toho důvodu i kalibrované modely vycházejí zpočátku období hůře než ke konci. Navíc, stejně jako v případě P-PO₄⁻³, došlo v každém segmentu k jednomu znatelnému výkyvu měřených hodnot, a to v různých časových úsecích. Z čeho tyto odchylky od průměru pramení, nedokážeme s jistotou říci. Teoreticky je možné, že došlo

k neočekávanému zkratovému proudu např. z důvodu přítomnosti hlodavců, krtků, či jiných živočichů, hloubících v podzemí systém chodeb.

Znečištění CHSK je v půdním profilu rozkládáno velice rychle a efektivně. Z grafů je dobře vidět strmý pokles koncentrace v prvních deseti až dvaceti centimetrech hloubky.

Na základě modelování však můžeme konstatovat, že ani kontaminací CHSK nejsou podzemní vody ohrožovány. Od hloubky 400 mm již ve všech segmentech byla koncentrace velmi blízká nule, v případě řepky olejné a vojtěšky seté tomu tak bylo už od hloubky 150 mm.

5 ZÁVĚR

Výsledky zhotovených modelů lze interpretovat tak, že při závlaze předčištěnou odpadní vodou s obdobnými parametry vstupního znečištění jako na KČOV Dražovice, nehrozí z hlediska sledovaných ukazatelů – amoniakálního dusíku, fosforu a chemické spotřeby kyslíku – kontaminace podzemních vod.

Ukázalo se, že zásadními faktory ovlivňujícími průběh znečištění je koncentrace znečištění odpadní vody na přítoku, velikost závlahové dávky a kořenový systém vegetace. S těmito parametry systému je třeba nadále pracovat pro efektivní a bezpečné nastavení závlahy odpadní vodou.

V případném dalším experimentálním měření by bylo vhodné umístit více pozorovacích bodů v prvních 500 mm profilu. Zejména u parametru $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by toto zahuštění přineslo přesnější představu o rozkladu znečištění po hloubce půdního profilu. U parametrů P-PO_4^{3-} a CHSK by navíc bylo vhodné prodloužit dobu experimentu o několik dalších týdnů. V druhé polovině měření by pravděpodobně došlo k ustálení procesu odbourávání znečištění, a numerické modely by byly blíže skutečnosti.

Doplňková závlaha předčištěnými odpadními vodami se zdá být vhodnou a bezpečnou alternativou v hospodaření s odpadními vodami a v přístupu k vodním zdrojům obecně. Po studiu této problematiky a několikaměsíční práci na simulačních modelech, popisujících šíření znečištění v půdním profilu věřím, že do budoucna se této prozatím okrajové záležitosti bude věnovat stále větší pozornost. I s ohledem na vývoj klimatu v České republice nejspíše mohou v budoucnu tvořit odpadní vody silný zdroj vody pro závlahu např. technických plodin.

Předmětem dalšího zkoumání v oblasti využití odpadních vod pro závlahu by měly být rozbor mikrobiálního znečištění, které nadále zůstává největší zdravotní hrozbou pro člověka. V práci nebyly řešeny specifické polutanty jako farmaka, xenobiotika, hormonální antikoncepce ani drogy. Všechny tyto látky představují další potenciální rizika, proto je třeba závlahu odpadní vodou řešit zodpovědně.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Agrocensus 2010 - Strukturální šetření v zemědělství a metody zemědělské výroby (vybrané údaje) [web]. 2011 [cit. 2018-09-25]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/agrocensus-2010-strukturalni-setreni-v-zemedelstvi-a-metody-zemedelske-vyroby-vybrane-udaje-n-i30w5hzfuu#>
- [2] AMET – sdružení Litschmann + Suchý [online]. Velké Bílovice, 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.amet.cz/>
- [3] Brázdil, R., Trnka, M. a kolektiv (2015): Historie počasí a podnebí v českých zemích XI: Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i., Brno, 402 s. ISBN 978-80-87902-11-0.
- [4] CÍSLEROVÁ, Milena a Tomáš VOGEL. Transportní procesy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-0101866-0
- [5] ČESKO. Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 3. 12. 2018]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-401#f5732565>
- [6] HORÁKOVÁ, Marta. Analytika vody. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-520-X.
- [7] JANDORA, J. 2008. Matematické modelování ve vodním hospodářství. Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. VUT v Brně.
- [8] KAMENÍČKOVÁ, Ivana: Hydropedologie - Hydropedologické praktikum. VUT FAST v Brně, 2006.
- [9] KOZLOVSKY DUFKOVÁ, Jana. Závlahy a odvodnění: teoretické základy a praktická cvičení. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-8073753351
- [10] KRÁLOVÁ, Helena. Vodní hospodářství krajiny I.: Část II - Závlahy. Studijní opora. Brno, 2005.

- [11] KULHAVÝ, František a Jan ŠÁLEK. Je závlaha odpadními vodami v naší krajině perspektivní?. *Vodní hospodářství*. 2018, 68(3), 23-26. ISSN 1211-0760.
- [12] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie* 10. Vyd. 2. přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02237-4.
- [13] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. *Chemie a technologie vody*. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-13-4.
- [14] Mapy.cz [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [15] NAVARRO, Ines, A. CHAVEZ, J.A. BARRIOS, C. MAYA, E. BECERRIL, S. LUCARIO a B. JIMENEZ. Wastewater Reuse for Irrigation — Practices, Safe Reuse and Perspectives. JAVAID, Muhammad Salik, ed. *Irrigation and Drainage - Sustainable Strategies and Systems* [online]. InTech, 2015, 2015-05-06 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.5772/59361. ISBN 978-953-51-2123-7. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/irrigation-and-drainage-sustainable-strategies-and-systems/wastewater-reuse-for-irrigation-practices-safe-reuse-and-perspectives>
- [16] PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9.
- [17] ŘÍHA, J. 2007. *Hydraulika podzemní vody*. Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. VUT v Brně.
- [18] SIEGEL, Seth M. *Budiž voda: izraelská inspirace pro svět ohrožený nedostatkem vody*. Přeložil Hana ŠKAPOVÁ. Praha: Aligier, 2016. ISBN 9788090642027
- [19] Směrnice Rady č. 91/271/EHS ze dne 21. května 1991, o čištění městských odpadních vod, ve znění Směrnice Komise č. 98/15/ES ze dne 27. února 1998.
- [20] Studijní opora FAST VUT v Brně, *Návody do cvičení – Hydropedologie*, Kameníčková 2013
- [21] Šejna, M., J. Šimůnek, and M. Th. van Genuchten, *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*, User Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 280, 2011.

- [22] Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, and M. Šejna, The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 258, 2011.
- [23] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů.
- [24] ZAVADIL, Josef. Kritéria využití městských odpadních vod k závlaze zemědělských plodin: metodika. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2008. ISBN 978-80-904027-5-1.
- [25] Závlahy a jejich perspektiva: sborník příspěvků z mezinárodní konference: Mikulov 18.-19.3.2015. Praha: [Český hydrometeorologický ústav], [2015]. ISBN 978-80-87577-47-9.

7 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Obsah nutrientů v odpadní vodě podle jejího původu [Kulhavý, Šálek, 2018]	13
Tabulka 2 Emisní standardy	24
Tabulka 3 Hodnoty $\text{NH}_4^+\text{-N}$ změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.	36
Tabulka 4 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$	42
Tabulka 5 Výpočet závlahové dávky pro trvalé travní porosty	44
Tabulka 6 Výpočet závlahové dávky pro řepku olejnou.....	45
Tabulka 7 Výpočet závlahové dávky pro vojtěšku setou	47
Tabulka 8 Hodnoty P-PO_4^{3-} změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.	49
Tabulka 9 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění P-PO_4^{3-}	56
Tabulka 10 Hodnoty CHSK změřené na přítoku a na odtoku v hloubce 0,5 a 1,0 m.	61
Tabulka 11 Souhrnná tabulka koeficientů z jednotlivých kalibračních modelů pro znečištění CHSK	68

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Hystereze retenční křivky (převzato: pedologie.czu.cz).....	17
Obrázek 2 Princip spojitosti – řez pórovitým prostředím, bodové rychlosti, specifický průtok [Říha, 2007].....	20
Obrázek 3 Zákon zachování hmotnosti [Jandora, 2008].....	21
Obrázek 4 Lokalita Dražovice – okres Vyškov (www.mapy.cz).....	26
Obrázek 5 Schéma měřicího objektu – půdorys a příčný řez.....	27
Obrázek 6 Realizace zkušebního zařízení (foto: M. Křiška)	28
Obrázek 7 Realizace zkušebního zařízení (foto: M. Křiška)	29
Obrázek 8 Rozvod postřikovače (vlevo), aplikace závlahy postřikovačem (vpravo) (foto: M. Křiška).....	29
Obrázek 9 Vzrostlá vegetace na osetých segmentech v závěru experimentu (foto: M. Křiška)	29
Obrázek 10 Mapa meteorologických stanic. Zdroj: www.amet.cz	30
Obrázek 11 Rozložení a velikost srážek v celém sledovaném období Zdroj: www.amet.cz...	31
Obrázek 12 Maximální srážka naměřená 6. 7. 2018 Zdroj: www.amet.cz	31
Obrázek 13 Nastavení geometrie modelu	32
Obrázek 14 Příklad nastavení dialogového okna dat pro inverzní řešení	33
Obrázek 15 Nastavení okrajových podmínek v inverzním modelu	35
Obrázek 16 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace..	37
Obrázek 17 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem.....	39
Obrázek 18 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou	40
Obrázek 19 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou	41
Obrázek 20 Nastavení okrajových podmínek v modelu	42

Obrázek 21 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (50.den)	43
Obrázek 22 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (20.den)	44
Obrázek 23 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (20.den)	46
Obrázek 24 Průběh znečištění $\text{NH}_4^+\text{-N}$ po ustálení (35.den)	47
Obrázek 25 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace..	51
Obrázek 26 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem	52
Obrázek 27 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou	54
Obrázek 28 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou	55
Obrázek 29 Průběh znečištění P-PO_4^{3-} po ustálení (55.den)	57
Obrázek 30 Průběh znečištění P-PO_4^{3-} po ustálení (55.den)	58
Obrázek 31 Průběh znečištění P-PO_4^{3-} po ustálení (50.den)	59
Obrázek 32 Průběh znečištění P-PO_4^{3-} po ustálení (185.den)	60
Obrázek 33 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment bez vegetace..	63
Obrázek 34 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s travním porostem	64
Obrázek 35 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s řepkou olejnou	66
Obrázek 36 Průběh znečištění ve sledovaných časových obdobích – segment s vojtěškou setou	67
Obrázek 37 Průběh znečištění CHSK po ustálení (35.den)	69
Obrázek 38 Průběh znečištění CHSK po ustálení (90.den)	70
Obrázek 39 Průběh znečištění CHSK po ustálení (45.den)	71
Obrázek 40 Průběh znečištění CHSK po ustálení (25.den)	72

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
HPV	hladina podzemní vody
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy
Sb.	sbírka zákonů
EHS	Evropské hospodářské společenství
1D	jednorozměrné
2D	dvourozměrné
3D	trojrozměrné
BSK	biologická spotřeba kyslíku
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
KČOV	kořenová čistírna odpadních vod
N-NH_4^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$	amoniakální dusík
Pc, Pcelk	fosfor celkový
KMnO_4	manganistan draselný
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	dichroman draselný